



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**ADITIVNÍ VÝROBA PROSTOROVÝCH PRUTŮ Z
POLYMERNÍCH MATERIÁLŮ**

ADDITIVE MANUFACTURING OF SPATIAL TRUSSES FROM POLYMERIC MATERIALS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Petr Křivohlavý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. David Škaroupka, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Petr Křivohlavý**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. David Škaroupka, Ph.D.**
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aditivní výroba prostorových prutů z polymerních materiálů

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Prostorové prutové struktury slouží k rychlému vyplnění objemu tělesa při nízké spotřebě materiálu. Vzniká lehký díl s optimalizovanou strukturální pevností pro danou aplikaci. Zadání směřuje na velkorozměrové aplikace využitelné v automotive, stavebnictví a architektuře, kde se v posledních deseti letech objevilo nejvíce aplikací. Výzvu představuje precizní zvládnutí procesu tavení a tuhnutí termoplastu a schopnost napojování na už vytisknuté prvky.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem práce je objasnit jevy, které umožňují kontrolovanou depozici taveniny termoplastu prostorovými strategiemi (bez nutnosti podkladu v celé délce nánosu). Předpokládá se ověření pomocí experimentálního robotického 3D tisku.

Dílčí cíle diplomové práce:

- analyzovat procesní vlivy na tuhnutí prostorového nánosu z hlediska geometrické přesnosti prutů,
- navrhnout experimentální měření tuhnutí nánosu v prostorové trajektorii metodou Design of Experiment,
- experimentální ověření přesnosti výtisku pomocí optické digitalizace a porovnáním s virtuálním modelem (inspekce).

Požadované výstupy: průvodní zpráva, fotografická dokumentace, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/magisterske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

HUANG, Yijiang, Juyong ZHANG, Xin HU, Guoxian SONG, Zhongyuan LIU, Lei YU a Ligang LIU. FrameFab: robotic fabrication of frame shapes. ACM Transactions on Graphics [online]. 2016, 35(6), 1-11 [cit. 2019-10-25]. DOI: 10.1145/2980179.2982401. ISSN 07300301. Dostupné z: <http://dl.acm.org/citation.cfm?doid=2980179.2982401>

KREJČÍŘÍK, Petr. Bezpodporový 3D tisk na 6-ti osém robotickém rameni. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2018. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing.David Škaroupka, Ph.D.

KUTHANOVÁ, Vanda. Rheology-structure-processability of multiphase polymer systems: Reologie, struktura a zpracovatelnost vícefázových polymerních systémů : doctoral thesis summary. Zlín: Tomas Bata University in Zlín, 2009. ISBN 978-80-7318-862-7.

ELIAS, Hans-Georg. Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry [online]. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co., 2000. ISBN 3527306730. Dostupné také z: https://doi.org/10.1002/14356007.a20_543

TEDESCHI, Arturo. AAD_Algorithms-aided design: parametric strategies using grasshopper. Brienza, Italy: Le Penseur Publisher, 2014. ISBN 978-88-95315-30-0.

WILLMANN, Jan, Philippe BLOCK, Marco HUTTER, Kendra BYRNE a Tim SCHORK, ed. Robotic fabrication in architecture, art and design 2018. Cham (Switzerland): Springer Nature Switzerland, 2018. ISBN 978-3-319-92293-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá výrobou polymerních prostorových prutů bez nutnosti podpory v celé délce nánosů pomocí robotického 3D tisku. Cílem práce je nalézt vhodné procesní parametry a tiskové strategie s ohledem na přesnost prutů. Pro dosažení cíle práce byl experimentálně sestaven statistický model vlivů jednotlivých procesních parametrů. Model umožňuje nalezení optimálních procesních parametrů dle požadavků. Pro takto zjištěné procesní parametry jsou testovány tiskové strategie pro zvýšení přesnosti tisku a kvality spojů mezi jednotlivými pruty. Vyhodnocení přesnosti je prováděno pomocí technologie optické digitalizace. Při tisku se zjištěnými procesními parametry a tiskovými strategiemi bylo dosaženo maximální odchylky 0,54 mm od ideálního tvaru.

KLÍČOVÁ SLOVA

3D tisk, prostorové struktury, KUKA robot, procesní parametry, tiskové strategie

ABSTRACT

This thesis is focused on creating polymer lattice struts without any necessary support in full length using robotic 3D printing. The aim of the thesis is to find suitable process parameters and printing strategies with respect to the accuracy of the polymer struts. A statistical model of effects of individual process parameters has been produced to achieve stated objectives. The model enables finding optimal process parameters. The printing strategies for thus established process parameters are tested to increase the accuracy of the finished print and the quality of the bonds between individual struts. The accuracy assessment is executed using optical 3D metrology. The maximum deviation from the nominal shape 0.54mm has been accomplished using discovered process parameters and printing strategies.

KEY WORDS

3D printing, lattice structures, KUKA robot, process parameters, printing strategies

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KŘIVOHLAVÝ, Petr. *Aditivní výroba prostorových prutů z polymerních materiálů*. Brno, 2021. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. David Škaroupka, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu práce Ing. Davidu Škaroupkovi, Ph.D. za odborné vedení, rady a profesionální přístup. Dále bych rád poděkoval Ing. Petru Krejčíříkovi za vstřícný přístup a odbornou pomoc v laboratoři robotické výroby. Nakonec bych rád poděkoval Ing. Tomáši Kouteckému, Ph.D. a Ing. Jakubovi Frankemu za ochotu a asistenci při řešení problémů v laboratoři optické digitalizace.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Davida Škaroupky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Materiály pro 3D tisk a jejich vlastnosti	16
2.1.1	Teplota skelného přechodu a teplota viskózního toku	16
2.1.2	Index toku taveniny	17
2.1.3	Tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita polymerů	18
2.1.4	Materiály pro 3D tisk	18
2.2	Fyzika 3D tisku	19
2.2.1	Silové rozložení při tisku	19
2.2.2	Propojení vláken	20
2.3	3D tisk prostorových struktur	21
2.3.1	WirePrint	21
2.3.2	FrameFab	22
2.3.3	Choreo	23
2.3.4	AI Build	24
2.3.5	Branch Tenchology	25
2.3.6	Mesh-Mould	26
2.3.7	Iridescence Print	28
2.3.8	FOAM	28
2.3.9	MotoMaker	30
2.3.10	CFRTP	31
2.3.11	Mataerial	33
2.3.12	Robotic Extrusion	33
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	35
3.1	Analýza problému	35
3.2	Analýza a zhodnocení řešerše	35
3.3	Cíl práce	38
3.3.1	Vědecká otázka a hypotézy	39
4	MATERIÁL A METODY	40
4.1	Postup řešení	40
4.2	Použité zařízení	41
4.2.1	Tisková hlava	41
4.2.2	Šestiosé robotické rameno	42
4.2.3	3D skener	43
4.3	Použitý materiál	44

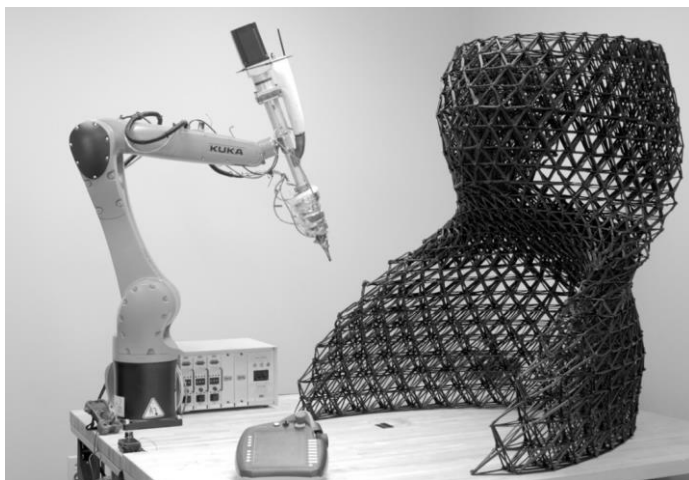
4.4	Generování řídicího programu	44
4.5	Experimenty pro zjištění procesních parametrů	45
4.5.1	Statistické plánování experimentu	45
4.5.2	Pruty ve tvaru lichoběžníků	46
4.5.3	Úprava tiskových strategií	49
4.5.4	Vodorovné pruty	49
4.5.5	Tisk objemové struktury	52
4.6	Vyhodnocení odchylek od ideálního tvaru	53
5	VÝSLEDKY	55
5.1	Pruty lichoběžníkového tvaru	55
5.1.1	Statistické plánování experimentu	55
5.1.2	Výsledky statistického plánování experimentu pro první čtyři odezvy	56
5.1.3	Výsledky statistického plánování experimentu pro druhé čtyři odezvy	60
5.1.4	Ověření statistického modelu a optimalizační nástroj	64
5.1.5	Zvýšení pevnosti spojů	67
5.1.6	Zvýšení přesnosti pomocí korekce trajektorie	70
5.1	Vodorovné pruty	71
5.1.1	Použití strategií napojení	73
5.2	Objemové struktury	76
6	DISKUZE	79
6.1	Procesní parametry a tiskové strategie	79
6.2	Možné zdroje chyb	80
6.3	Nedostatky tisku	80
6.4	Aplikace poznatků	83
6.5	Vědecká otázka a hypotézy	84
7	ZÁVĚR	85
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	86
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	89
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	90
11	SEZNAM TABULEK	93
12	SEZNAM PŘÍLOH	94

1 ÚVOD

Trojrozměrný tisk je jednou z nejprogresivnějších technologií současnosti, lze jej použít i při vytváření struktur tvořených prostorovými pruty. Takovéto prostorové struktury můžeme najít v různých aplikacích, často například ve stavebnictví či architektuře, letectví nebo automobilním průmyslu. Jsou vhodné pro vyplnění velkorozměrových dílů, u kterých je požadována určitá pevnost a zároveň nízká hmotnost. Dalším přínosem může být také úspora materiálu. Struktury jsou často vyráběny pomocí technologie FDM, kterou lze kombinovat s možnostmi šestiosého robota. Výhodou oproti konvenčním 3D tiskárnám, které se mohou v prostoru pohybovat pouze v lineárních osách, je možnost robota natáčet tiskovou hlavu kolem všech os, díky čemuž lze nanášet extrudovaný materiál pod úhlem. To umožňuje pracovat lépe se silami působícími v prutu při jeho tisku. Výhodou je také rozsah pracovního prostoru robota, který umožňuje vytvářet velkoprostorové aplikace.

Největším problémem je samotná depozice taveniny v prostoru, která většinou probíhá velmi pomalu. Obtížné je taky dosáhnout dokonalého napojení na již vyrobené části. Pro maximální efektivitu výroby prostorových struktur je potřeba zvolit vhodné procesní parametry. Za ty můžeme považovat třeba rychlost posuvu, rychlost extruze materiálu, či teplotu taveniny, na kterou má významný vliv způsob a množství chlazení. Na tyto parametry mají dále významný vliv tepelné a mechanické vlastnosti použitého polymerního materiálu.

Díky vhodně zvoleným tiskovým strategiím a procesním parametrům lze tisknout kvalitní a geometricky přesné modely v kratším čase. Toho se dá mimo jiné využít i pro tvorbu tzv. drátových modelů, kdy je možné pomocí prostorových prutů vytisknout pouze tvar objektu bez výplně a tím ušetřit velké množství času. Zatím však neexistuje žádný komplexní popis, jak dosáhnout kvalitních struktur. Cílem práce je tedy navrhnout vhodné tiskové strategie a procesní parametry pro tvorbu geometricky kvalitních struktur s dobrými mechanickými vlastnostmi.



obr. 1-1: 3D tisk prostorových struktur [1]

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

3D tisk prostorových struktur je neobvyklá technologie, které se věnuje pouze malé množství výzkumných týmů. Pro co nejlepší výsledky je nutné zaměřit se na dosavadní poznatky v této oblasti. Důležitým aspektem jsou ale také materiálové vlastnosti a možnosti dostupného vybavení.

2.1 Materiály pro 3D tisk a jejich vlastnosti

Dnes existuje velké množství polymerních materiálů určených pro 3D tisk pomocí technologie FDM. Tyto materiály musí splňovat určité vlastnosti, tak aby byly pro tuto technologii vhodné. Jde o vlastnosti mechanické, ale především i o vlastnosti termodynamické. Hlavními sledovanými vlastnostmi jsou:

- Teplota skelného přechodu
- Teplota viskózního toku
- Index toku taveniny
- Tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita
- Mechanické vlastnosti (Pevnost v tahu a ohybu, vrubová houževnatost)

2.1.1 Teplota skelného přechodu a teplota viskózního toku



obr. 2-1: Deformační vlastnosti u polymorfních polymerů [2]

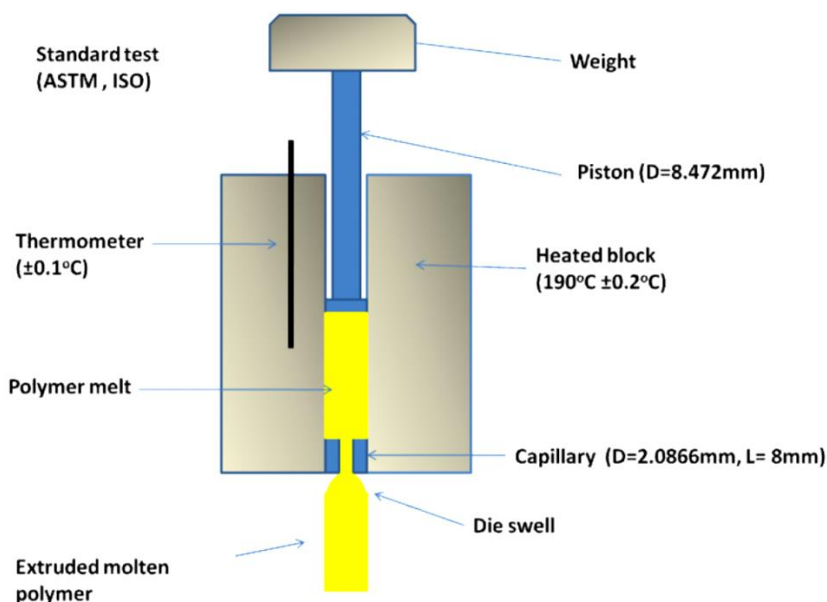
Teplota skleného přechodu T_g je jednou z nejdůležitějších vlastností [2]. V okolí této teploty dochází ke skokovým změnám meze pevnosti nebo koeficientu teplotní roztažnosti. Hodnota teploty skelného přechodu je závislá na ohebnosti řetězců a na velikosti mezimolekulárních sil. Při překročení této teploty dochází k přechodu polymeru z pevného stavu do kaučukovitého.

Při dosažení teploty viskózního toku T_f dochází k nárůstu změn v polymerním materiálu. Ten začíná získávat vlastnosti vysoce viskózní kapaliny. Při dalším zahřívání materiálů by bylo dosaženo teploty T_z , při které dochází k tepelné degradaci materiálu. Abychom mohli materiál zpracovávat, musíme překonat teplotu viskózního toku, ale nesmíme dosáhnout teploty tepelné degradace [3].

2.1.2 Index toku taveniny

Index toku taveniny (Melt Flow Index – MFI) je vlastnost sloužící k popisu polymerní taveniny [4]. MFI je měřen pomocí kapilárního viskozimetru (obr. 2-2). Jedná se o množství materiálu, které proteče definovanou kapilárou za deset minut. Index je možné dělit na objemový a hmotnostní. U hodnoty MFI musí vždy být uvedena teplota taveniny a zatížení které na ní působilo.

Index většinou slouží k hodnocení kvality materiálu nebo k hodnocení vlivu plnění daného polymeru [5]. Nízká hodnota MFI značí vysokou viskozitu taveniny, naopak vysoká hodnota MFI značí nízkou viskozitu.



obr. 2-2: Kapilární viskozimetr [6]

2.1.3 Tepelná vodivost a měrná tepelná kapacita polymerů

Tepelná vodivost je schopnost materiálu, která je definována jako rychlost kterou se šíří teplo ze zahřáté části do části chladnější. Tepelnou vodivost můžeme popsat součinitelem tepelné vodivosti λ , který je definovaný jako množství tepla, které projde plochou materiálu o dané tloušťce za určitý čas, kdy jednotlivé strany mají rozdílnou teplotu [7]. Polymery nemají vysokou tepelnou vodivost, jedná se spíše o tepelné izolanty. Hodnota součinitele tepelné vodivosti se pro polymerní materiály standardně pohybuje v rozmezí $(0,1 \div 0,5) \text{ W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [8].

Měrná tepelná kapacita c_p vyjadřuje množství tepla, které je nutné dodat materiálu o určité hmotnosti, aby dosáhl určitého rozdílu teplot [9]. Hodnota měrné tepelné kapacity se u polymerů mění s teplotou. Při přechodu přes teplotu viskózního toku je měrná tepelná kapacita vyšší než v tuhém stavu. Při pokojové teplotě se hodnoty měrné tepelné kapacity u běžných polymerů pohybují zhruba v rozsahu $(0,9 \div 2,2) \text{ kJ}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ [8].

2.1.4 Materiály pro 3D tisk

V současné době existuje velká škála komerčně dodávaných materiálů pro 3D tisk různých vlastností a možností. Nejčastější využívanými materiály jsou však ABS, PLA, PET a PC [10].

ABS (Akrylonitril-butadien-styren) je amorfní termoplastický průmyslový kopolymer. Jeho hlavní výhodou je vysoká odolnost proti mechanickému poškození. Nevýhodou může být naopak jeho smrštivost a výpary vznikající při tisku. Lze využít i variantu ABS+, která dosahuje ještě lepších mechanických vlastností a zaručuje i lepší tepelné vlastnosti.

PLA (Polylactic Acid) patří mezi nejpoužívanější materiály. Jedná se o biologicky odbouratelný materiál vyráběný z materiálů jako kukuřičný škrob. Oproti ABS nedisponuje tak vysokými mechanickými vlastnostmi a tepelnou odolností, má však nižší teplotu skelného přechodu a viskózního toku, díky čemuž je snadněji zpracovatelné. Jedná se o materiál, který má sklon pohlcovat vzdušnou vlhkost, což může ovlivnit kvalitu tisku. Existuje velké množství variant tohoto materiálu, například plněný dřevěnými nebo kovovými pilinami.

Polyetylen tereftalát (PET) je transparentní materiál pro 3D tisk. Nejčastěji se používá modifikovaný pomocí glykolu s označením PET-G. Má mírně vyšší teplotu tavení než ABS, a dosahuje podobných mechanických vlastností.

Mezi další časté materiály patří PC (polykarbonát). Jedná se o jeden z nejodolnějších materiálů pro 3D tisk. Jeho nevýhodou je vyšší pracovní teplota. Velmi časté je jeho použití v kombinaci s ABS jako kompozitní materiál. Ten má nižší teplotu tavení, a může dosahovat i lepších mechanických vlastností než běžné PC.

tab. 2-1: Vlastnosti polymerů [11–13]

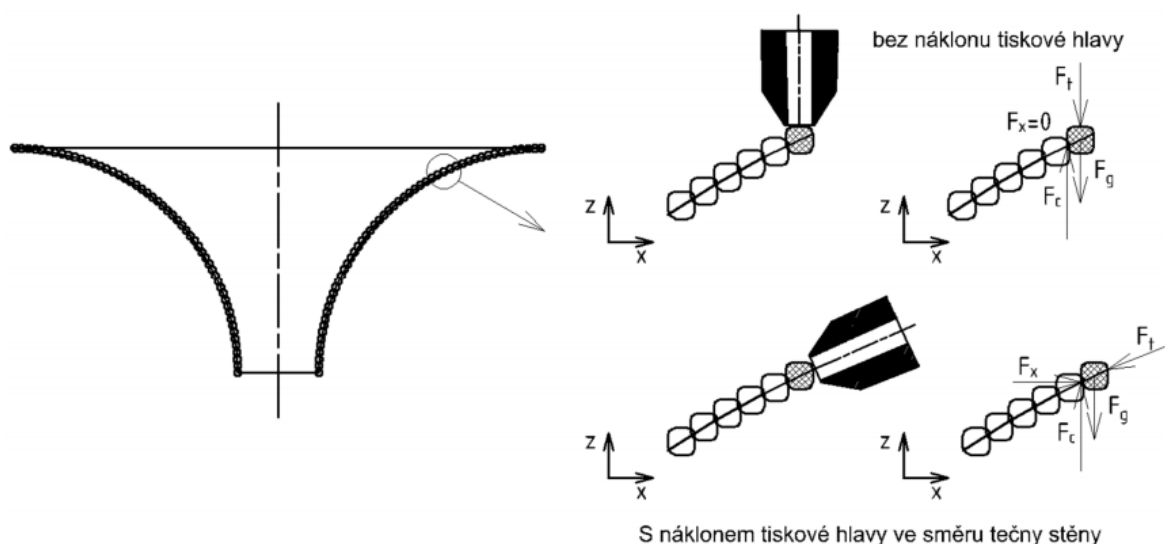
Materiál	ABS	PLA	PET	PC
Teplota skelného přechodu T_g (°C)	90	60	80	150
Teplota viskózního toku T_f (°C)	230	190-220	250	270
Tepelná vodivost α ($W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$)	0,3	0,13	0,15-0,24	0,2
Měrná tepelná kapacita c_p ($kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$)	1,6	1,8	1,0	1,2
Pevnost v tahu (MPa)	45-50	40-45	55-75	55-75

Z údajů v tab. 2-1 lze vyčíst, že teplota skelného přechodu je pro materiál PLA nejnižší. Jedná se totiž o teplotu, kterou je nutné překonat pro kvalitní spojení jednotlivých prutů. PLA má však nejnižší pevnost, rozdíl proti ostatním materiálům však není tak zásadní.

2.2 Fyzika 3D tisku

2.2.1 Silové rozložení při tisku

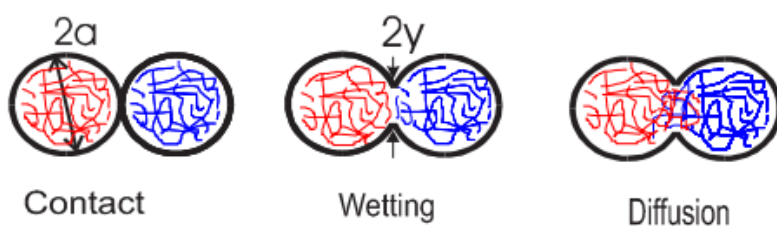
Při vytlačování materiálu dochází k silovému působení vytlačovaným materiálem na již vytlačenou část. Směr tohoto působení lze měnit pomocí natáčení tiskové hlavy, což umožňuje právě využití šestiosého robota. Na obr. 2-3 je znázorněno silové působení při tisku převísleho objektu [14], kdy tisk je prováděn metodou vrstvu po vrstvě. Na tištěné vlákno vždy působí gravitační síla F_g a síla F_t , tedy síla extruze. Síla F_c znázorňuje sílu v kontaktu potřebnou pro zajištění spojitosti vláken. Správným natočením tiskové hlavy se zmenšuje svislý rozklad síly F_t a tedy i potřebná síla F_c , díky tomu lze zvýšit tisknutelnost převisů [15]. Naklopením tiskové hlavy se zvýšila nejen tisknutelnost, ale zároveň i přesnost tištěných modelů.



obr. 2-3: Silové působení tištěného materiálu [14]

2.2.2 Propojení vláken

Při napojování dvou vláken k sobě (v případě prostorových struktur v uzlech) je nutné zajistit jejich dostatečné propojení [16]. Nejlepším dosažitelným způsobem je difúzní propojení (obr. 2-4 vpravo). Polymerní řetězce se mezi sebou propletou a vznikne tak pevný spoj. Aby došlo k takovéto difúzi, musí již vytištěná část, ke které je připojována nová, překonat teplotu skelného přechodu. Při nedostatečné difúzi (obr. 2-4 uprostřed) dojde k vzájemnému natavení vláken a jejich spojení. Tento spoje však není kvalitní a může snižovat mechanické vlastnosti. Kritickým případem je, když dojde pouze ke kontaktu jako na obr. 2-4 vlevo, ale ne k propojení vláken.



obr. 2-4: Režimy propojení vláken [16]

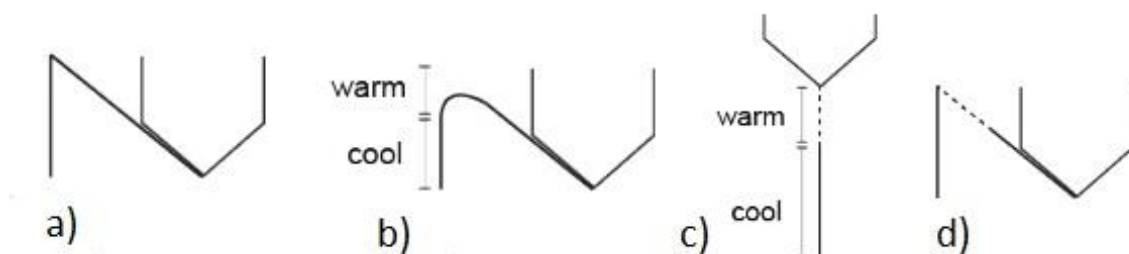
2.3 3D tisk prostorových struktur

2.3.1 WirePrint

Mueller se v článku [17] zabývá úsporou výrobního času pro 3D tisk koncepčních návrhů. Toho dosahuje nahrazením plného modelu pomocí prutové struktury. Prutovou strukturu z modelu vytváří tak, že rozřeže model do horizontálních kontur, jejichž vzdálenost od sebe je v intervalu od dvojnásobku průměru trysky po výšku trysky. Tyto kontury jsou následně propojeny cikcak vzorem. Díky této metodě lze snížit čas výroby prototypu až na desetinu, a tak vytvořit větší počet návrhových iterací v daném čase.

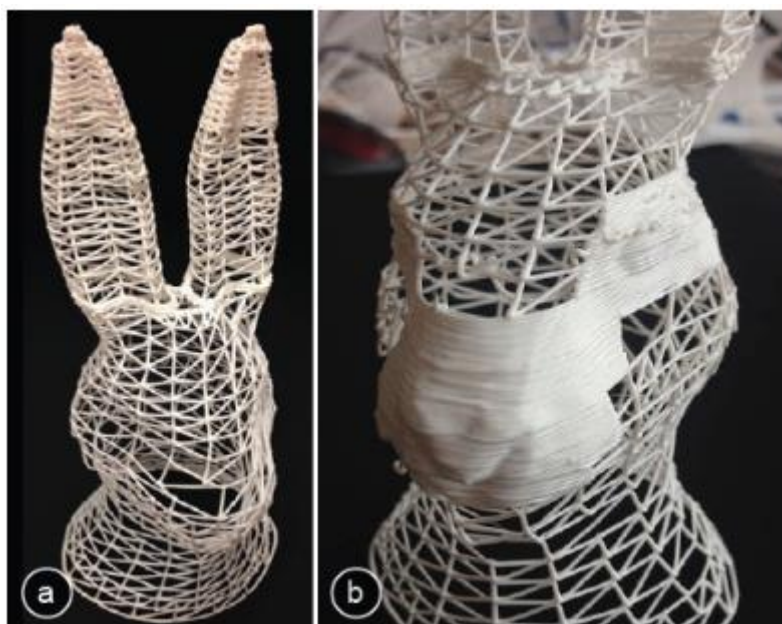
Řešení WirePrint je navrženo pro běžné FDM tiskárny, autor však využívá 3D tiskárnu typu delta, konkrétně Kossel Mini. Tato tiskárna má výhodu proti běžným tříosým tiskárnám především v rychlosti posuvu v ose Z, což je pro tvorbu takovýchto prutových modelů potřeba. Výtisk je poté chlazen pomocí dvou trysek stlačeného vzduchu vedených směrem k tiskové trysce. V místech kde je potřeba dosáhnout napojení prutů je přívod chladicího vzduchu vypnut pomocí solenoidového ventilu. Maximální rychlost extruze byla stanovena na 30 mm/s se sekundovou pauzou na konci každého prutu.

Práce se také zabývá problematikou ostrých rohů. Při změně směru výnosu materiálu nedojde k tvorbě ostrého rohu, protože materiál ještě nezchladl pod teplotu skelného přechodu. Tento problém je řešen protažením trajektorie před změnou směru, jak lze vidět na obr. 2-5.



obr. 2-5 a) požadovaný tvar b) problematika ohnutí prutu c) protažení trajektorie d) vliv protažení na výsledek [17]

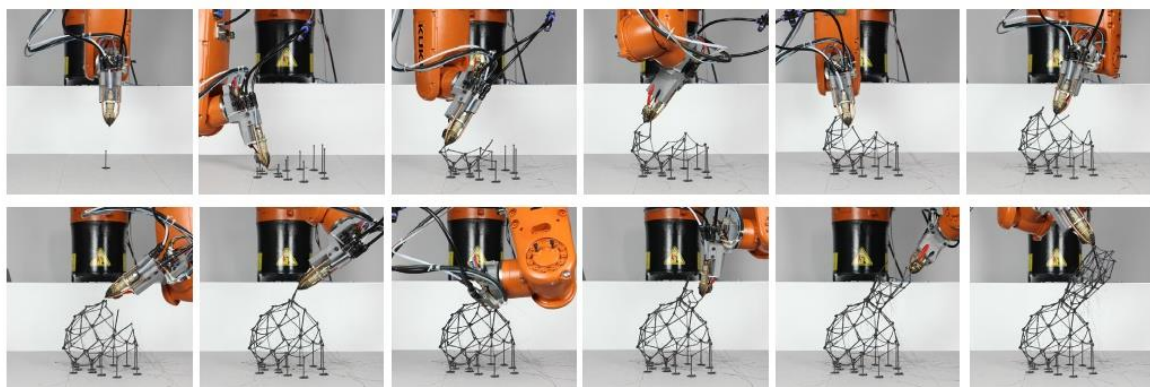
Tento systém umožňuje mimo jiné i vyplnění části modelu metodou vrstvu po vrstvě jako můžeme vidět na obr. 2-6. Toto je vhodné v případě že chceme na části modelu zvýraznit skutečný tvar.



obr. 2-6: a) Model vytvořený čistě pomocí prutové struktury b) část modelu vyplněna vrstvy po vrstvě [17]

2.3.2 FrameFab

V tomto článku [18] se autoři věnují tvorbě prostorových 3D struktur pomocí robotického šestiosého ramene KUKA. Tisk probíhá pomocí speciální tiskové hlavy s chlazením pomocí stlačeného vzduchu. Ten je vedený přímo k vyústění materiálové trysky pod tlakem 0,02 MPa. Stlačený vzduch je dodáván při tisku prutu a odjezdu robota od tištěné struktury. Při napojování na již natištěnou část není tisk chlazen pro lepší propojení obou materiálů.



obr. 2-7: Postup 3D tisku prostorové struktury [18]

Práce se dále zabývá především tvorbou algoritmu pro tvorbu tiskové trajektorie. Ta musí být vytvořena tak, aby každá postupně vytisknutá část byla staticky určitá a samonosná, a zároveň aby nedocházelo ke kolizím tiskové hlavy s již vytisknutým materiálem (obr. 2-7). Z důvodu samonosnosti struktury byly provedeny statické analýzy pomocí metody konečných prvků, v každém kroku výroby. Kontrola kolizí nebyla prováděna k tělu robota,

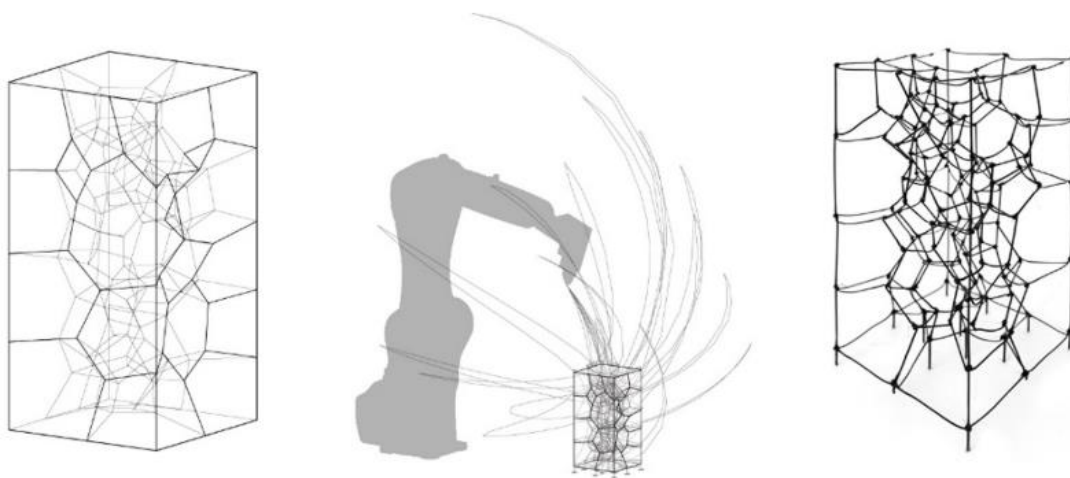
ale pouze k tiskové hlavě, a to především z důvodu zjednodušení výpočtu. Tisková hlava byla pro zjednodušení nahrazena kuzelem s osou v ose extrudéru a úhlem α , tak aby nemohlo dojít ke kolizi. Osa tiskové hlavy se při tvorbě jednotlivých prutu nemění, robot se natáčí vždy až v uzlech.

Pro ověření algoritmů používají autoři při výrobě struktur materiál ABS s přídavkem uhlíkového prášku. Rychlost posuvu se v průběhu tisku mění. Při tisku prutu do prostoru se jedná o 1,3 mm/s a pro tisk mezi dvěma uzli 9mm/s. V těchto dvou fázích se také mění rychlost extruze materiálu, kdy při tisku mezi dvěma uzli je o 20 % menší než při tisku prutů do prostoru. Průměr vytištěných prutů je 1,5 mm.

2.3.3 Choreo

Huang prezentuje v práci [19] možnost využití nového systému pro plánování pohybu robotického ramene pro 3D tisk prostorových struktur. Tento systém nazývaný Choreo, je schopný pracovat bez lidského zásahu. Systém na základě dodané geometrie první sestaví plán výstavby, tedy navrhne optimální pořadí prutů k tisku, tak aby struktura byla stabilní a zároveň vždy existoval prostor pro tiskovou hlavu a nemohlo tak dojít ke kolizi. V druhém kroku vypočte co nejefektivnější pohyb všech os robotického ramene. Nakonec naplánuje samotnou trajektorii. Systém je pod licencí MIT.

Tento systém autor využívá na třech objektech s nestandardní topologií. Jedná se o topologicky optimalizovanou klenbu, Voroného 3D strukturu (obr. 2-8) a design příbytku vhodného pro Mars. Výpočetní čas pro tvorbu řídicího programu byl na běžně dostupném počítači něco mírně přes hodinu a to bez lidského zásahu, pouze s nahráním geometrie. Následný tisk struktur zabral zhruba 3 hodiny. Velkou výhodou systému Choreo je, že není závislý na značce robota nebo jeho typu. Dále je schopný pracovat s velkým množstvím post - processingových aplikací.

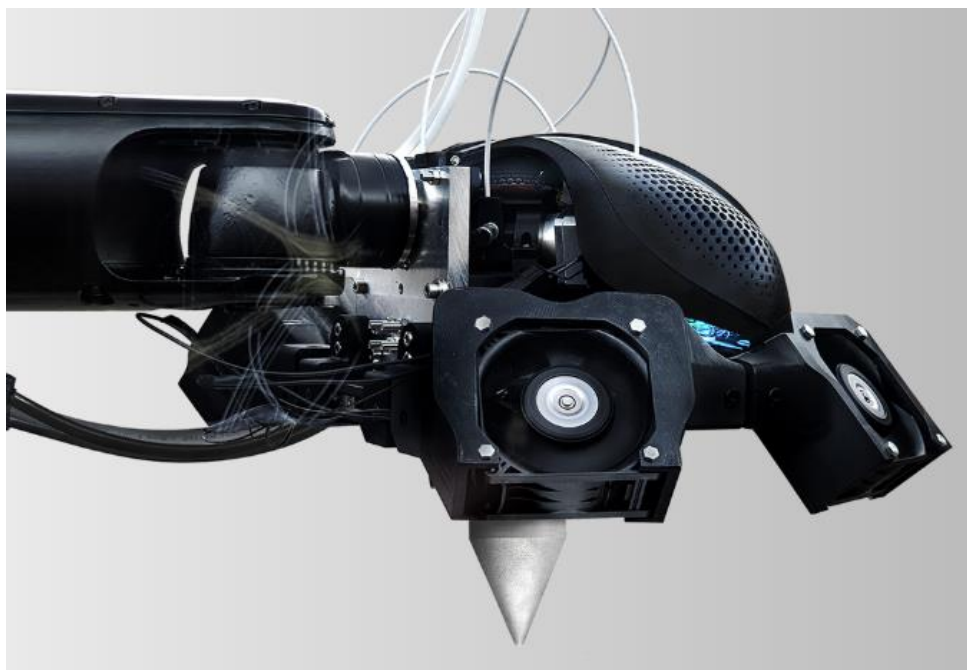


obr. 2-8: 3D Voroného struktura zleva: model, trajektorie tisku, vytištěná struktura [19]

2.3.4 AI Build

AI Build je britská společnost zabývající se velkorozměrovým 3D tiskem především v architektuře [20]. Mimo jiné využívá prostorový tisk i k tvorbě uměleckých instalací, případně nábytku.

Společnost nabízí komerční řešení velkorozměrového 3D tisku, pro které využívá webovou aplikaci AI Sync. Jedná se o cloudové řešení umožňující nastavení 3D tisku a tvorbu trajektorie, tak aby bylo co nejefektivněji využito možností šestiosého robota.



obr. 2-9: koncový efektor AiMaker [20]

Společnost dále vyvinula tiskovou hlavu AiMaker (obr. 2-9) umožňující tisk s vysokou přesností. Tisková hlava je vhodná pro široké spektrum polymerních a kompozitních materiálů. Konstrukce je postavena na kovovém skeletu zajišťujícím dostatečnou tuhost. Dále je zde použito celokovového hotendu pro zajištění konstantní extruze materiálu. Chlazení je zajištěno pomocí čtyř ventilátorů rozestavěných kolem trysky. Robot s touto tiskovou hlavou je umístěn ve speciálním boxu s názvem AiCell. Ten obsahuje veškeré potřebné příslušenství, jako cívky s filamentem, elektroniku nebo vnitřní vyhřívání. Díky uzavřenému prostoru je možné perfektně temperovat tiskový prostor. Společnost při tisku využívá robota, nevyužívá však natáčení tiskové hlavy. Robot je využíván především kvůli velkému tiskovému prostoru.



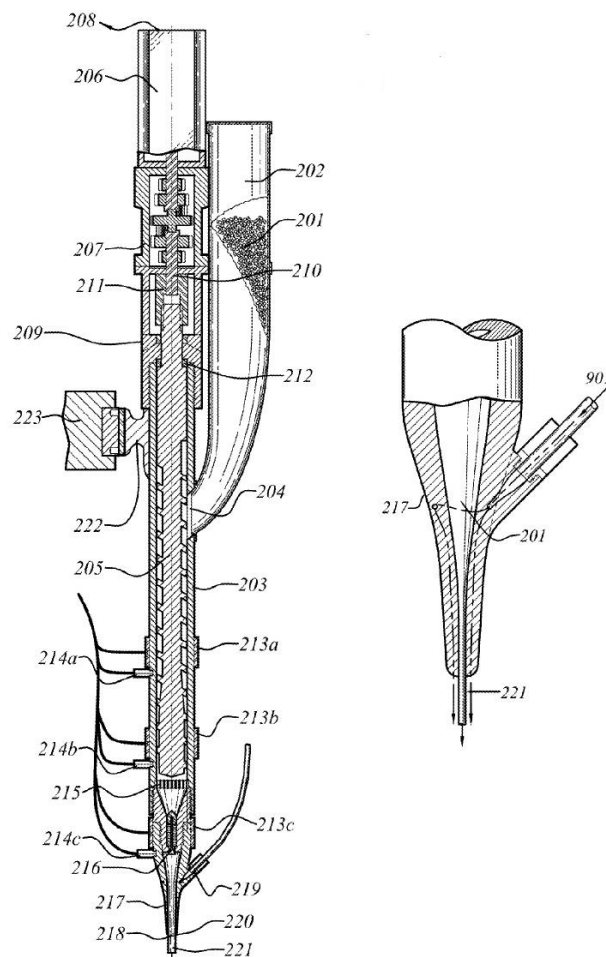
obr. 2-10: Bednění pro lití betonu společnosti AI Build [20]

Praktickou aplikaci můžeme vidět na obr. 2-10. Jedná se o bednění pro betonové stěny, které by bylo pomocí konvenčních metod obtížné vyrobit. Výhodou je také nízká hmotnost vůči pevnosti, což umožňuje snadnější práci s takovýmto bedněním.

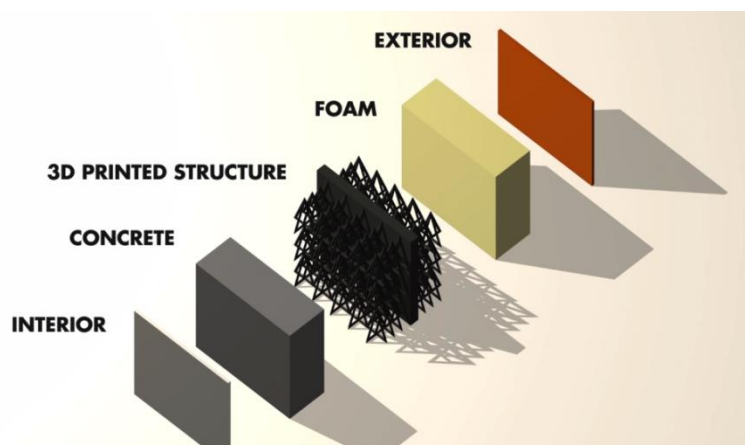
2.3.5 Branch Tenchology

Americká společnost sídlící v městě Chattanooga ve státě Tennessee se zabývá velkorozměrovým 3D tiskem v různých aplikacích, nejčastěji se však věnuje aplikacím v architektuře a uměleckým instalacím [21]. Společnost disponuje patentem [22] na 3D tiskovou technologii s názvem Cellular Fabrication. Jedná se o technologii umožňující tuhnutí materiálu v prostoru. Tato technologie využívá extrudér tvořený šroubem, který vytlačuje roztavený materiál z trysky (obr. 2-11). Materiál je k šroubu přiváděn ve formě peletek ze zásobníku připevněném k efektoru šestiosého robota, které jsou taveny pomocí topných patron. Tuhnutí materiálu je urychleno pomocí chlazení. To zajišťuje tlakový vzduch vedený do místa tisku kanálky v trysce tiskové hlavy.

Společnost se také věnuje vývoji speciálních stěn pro stavebnictví, kdy jejich skelet je tvořen polymerní prutovou strukturou [1]. Tento skelet je následně uzavřen krycí vrstvou a vyplněn buďto speciální pěnou, nebo betonem. Tyto stěny následně disponují nízkou montážní hmotností a vysokou pevností. Pro stavbu struktur využívá společnost roboty značky KUKA s lineárním pojezdem, což umožňuje větší variabilitu tisku.



obr. 2-11: tisková hlava a způsob chlazení stlačeným vzduchem skrz trysku [22]



obr. 2-12: Ukázka stěny společnosti Branch Technology [1]

2.3.6 Mesh-Mould

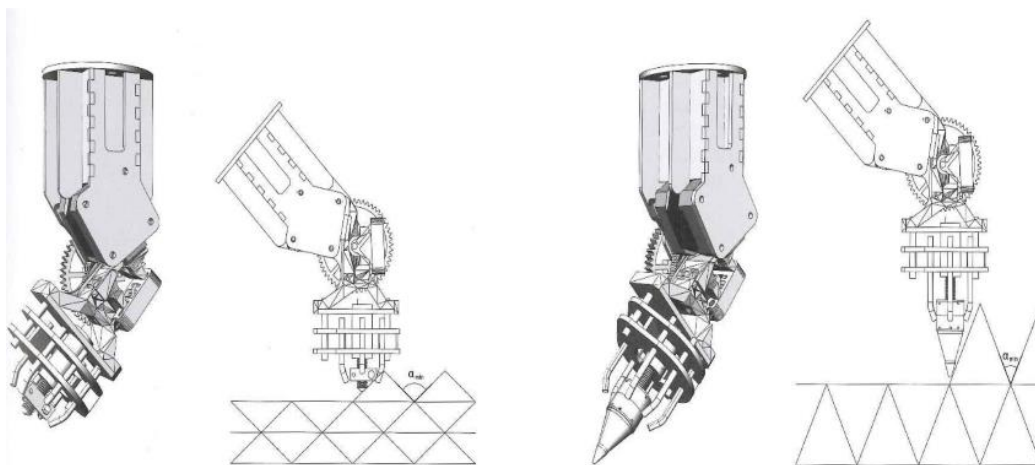
Hack se podobně jako Boyd věnuje využití prostorových polymerních struktur jako výztuže pro betonové stěny [23]. Tyto struktury jsou tvořeny pravidelnou sítí vytvořenou pomocí algoritmu mezi dvěma libovolnými plochami. Horizontální pruty jsou následně spojeny

cikcak, tak aby vytvářely trojúhelníky, jako na obr. 2-13 vlevo. Celá síť je následně zalitá betonem a tvoří tak armování stěny.



obr. 2-13: Armování betonové stěny pomocí polymerní prutové struktury [23]

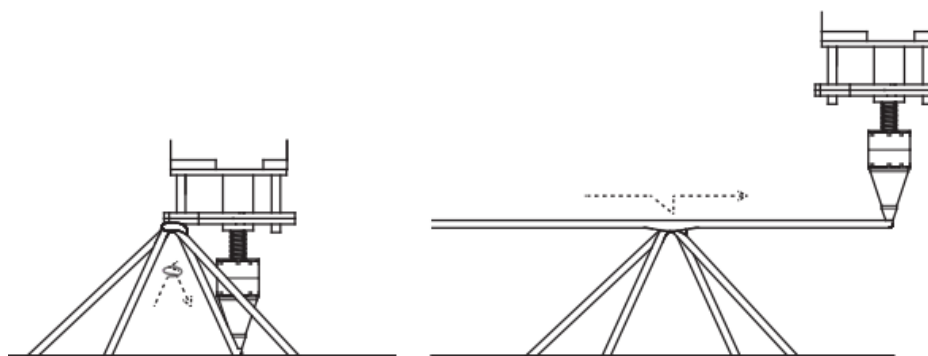
Práce se zabývá také nutností úpravy tiskové hlavy, tak aby umožňovala lepší možnost tisku (obr. 2-14). Pro stavbu delších prutů a tím i snížení objemového podílu materiálu je nutné používat delší a štíhlejší trysky. Pro výrobu je použito běžného materiálu PLA. Ten je vytlačován o průměru 2 mm a následně chlazen v místě extruze pomocí šesti trysek se stlačeným vzduchem, aby došlo k co nejrychlejšímu tuhnutí. Takto vytvořená síť tvoří následně 2,5 % objemu stěny. Autor dále zmiňuje nedostatky v pevnosti sítě a problematice chlazení. Pro zlepšení nedostatku v chlazení autor navrhuje jeho přerušování v uzlech a změny jeho proudění v průběhu tisku.



obr. 2-14: rozdíl možností prutové struktury podle tvaru trysky [23]

2.3.7 Iridescence Print

Tato práce [24] navazuje na práci [23], Helm se v ní věnuje popisu výstavby umělecké aplikace pro výstavu L'usage des formes-Artisans d'art et artistes v Paříži. V rámci popisu se věnuje výstavbě jednotlivých částí prutové struktury (obr. 2-15). Při výstavbě více prutů tvořících uzel udělá tisková hlava v uzlu smyčku, tak aby v uzlu bylo více materiálu pro další napojení. Při tisku vodorovných prutů mění trysky v uzlu výšku, tak aby došlo k lepšímu spoji. Pro dostatečné chlazení je využíváno stlačeného vzduchu.

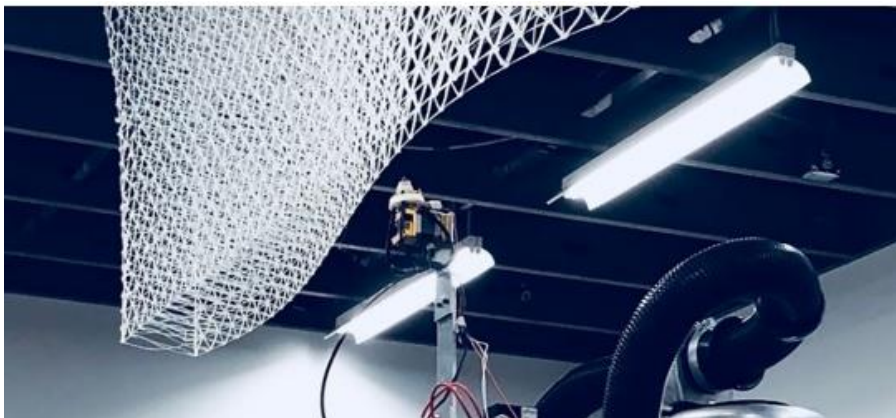


obr. 2-15: Náčrt tiskové strategie v uzlu [24]

V práci je také popsána tvorba dlouhého přemostění o délce 70 cm bez nutnosti podpor. Při tisku bylo vypnuto chlazení, aby prut chladl pomaleji a zabránilo se tak jeho smršťování. Při tomto nastavení byla odchylka ve středu přemostění 5 mm, postup výstavby na toto přemostění už není popsán, stejně tak jako další procesní parametry.

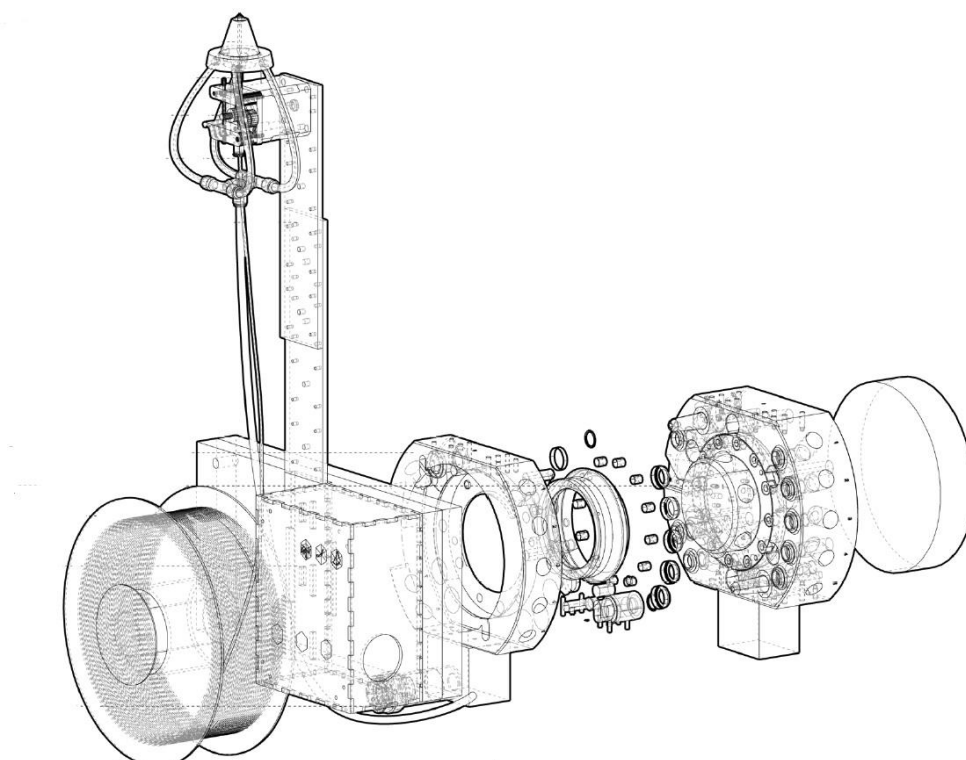
2.3.8 FOAM

Free Oriented Additive Manufacturing (FOAM) neboli volně orientovaná aditivní výroba je technika, kterou popisuje Guevara. Autor v článku nevyužívá klasický tisk, kdy tisková hlava směřuje směrem k zemi, ale naopak tisknou tiskovou hlavou otočenou vzhůru na podložku umístěnou pod stropem [25]. Takového tisku lze docílit díky perfektní adhezi tištěného materiálu s podložkou. Tuto metodu lze využít tak, aby co nejefektivněji využila silové působení během tisku. Další možností je tisk na zakřivené povrchy. Je zde také snaha využít pro experiment komerčně dostupná zařízení namísto speciálních tiskových hlav.



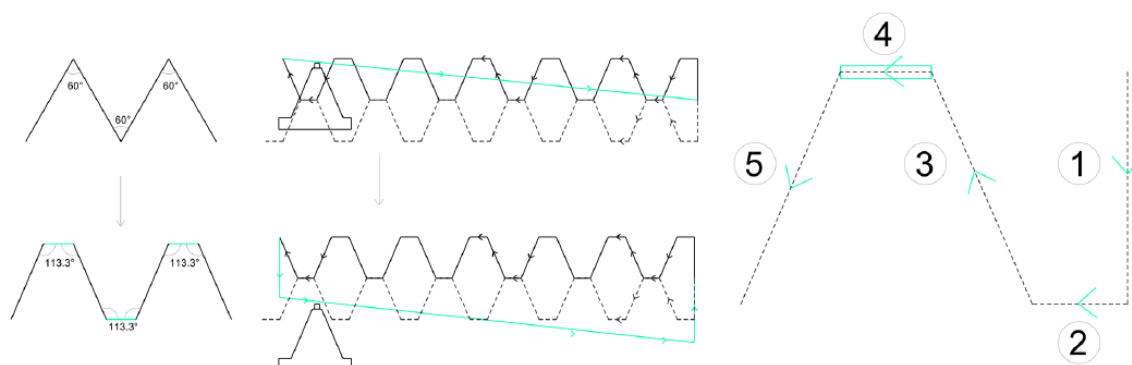
obr. 2-16: Volně orientovaná aditivní výroba [25]

Pro co největší manévrovatelnost a volnost orientace je nutné, aby byl celý tiskový systém umístěn na efektoru robota (obr. 2-17). V oblasti příruby robota je umístěn box s elektronikou a cívka s navinutým materiálem. Vlastní extrudér je následně umístěn na hliníkovém plátu, tak že vzdálenost špičky trysky od středu příruby robota je 450 mm. Použitý extrudér je získán z komerční 3D tiskárny. Extrudovaný materiál je následně chlazen čtyřmi tryskami s tlakovým vzduchem. Nejlepších výsledků autoři dosáhli při vzdálenosti chladících trysek od trysky extrudéru 25 – 40 mm při tlaku 1 bar. Tato tisková jednotka zvládne pracovat s pestrými škálami materiálů jako je PLA, ABS, PETG a další. Nejlepších výsledků autoři dosáhli s materiálem PLA.



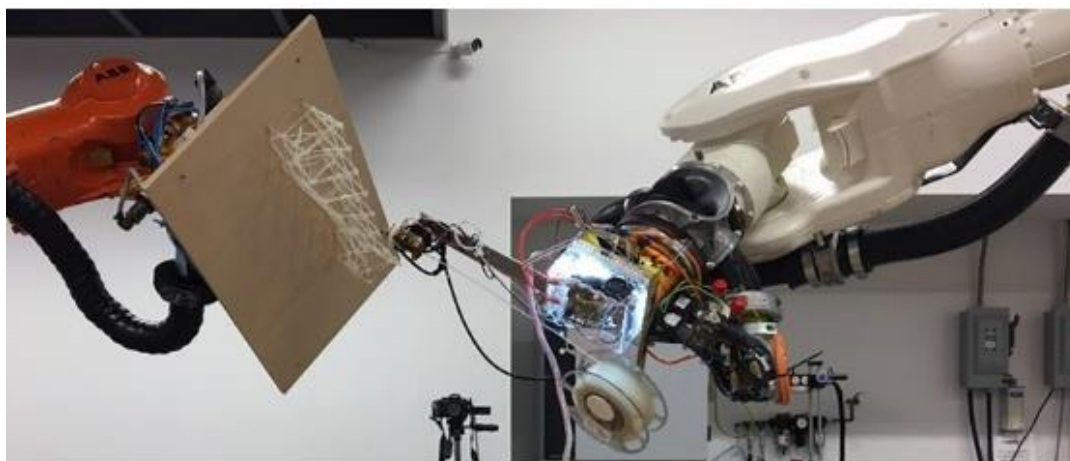
obr. 2-17: koncový efektor [25]

Práce popisuje výrobu prutové struktury tvořené opakujícím se vzorem lichoběžníků (obr. 2-18). Pohyb je rozdělen do pěti samostatných pohybů, kdy první pohyb slouží pouze jako počátek struktury, další čtyři pohyby se poté periodicky opakují. Na konci každého pohybu je provedena pauza v řádu několika sekund aby stihl materiál zchladnout a byl tak vytvořen ostrý přechod. Při klesavých pohybech jako je pohyb 1 a 5 je materiál tryskou tlačén, při stoupavých naopak táhnut. Tisk je prováděn při rychlosti posuvu 3 mm/s.



obr. 2-18: Schéma prostorové struktury a postup její výroby [25]

Jedním z experimentů, který autoři provedli, byla synchronizace dvou šestiosých robotů, kdy k jednomu byla připevněna tisková hlava a ke druhému podložka na kterou bude probíhat tisk (obr. 2-19). Díky vhodnému napolohování obou robotů při tisku každého z prutů dochází silovým působením od materiálové trysky téměř k eliminaci gravitační síly. Při experimentu byla vytištěna výše zmíněná prostorová struktura. Při porovnání vytištěné struktury s virtuálním modelem byla zjištěna odchylka 7 %.

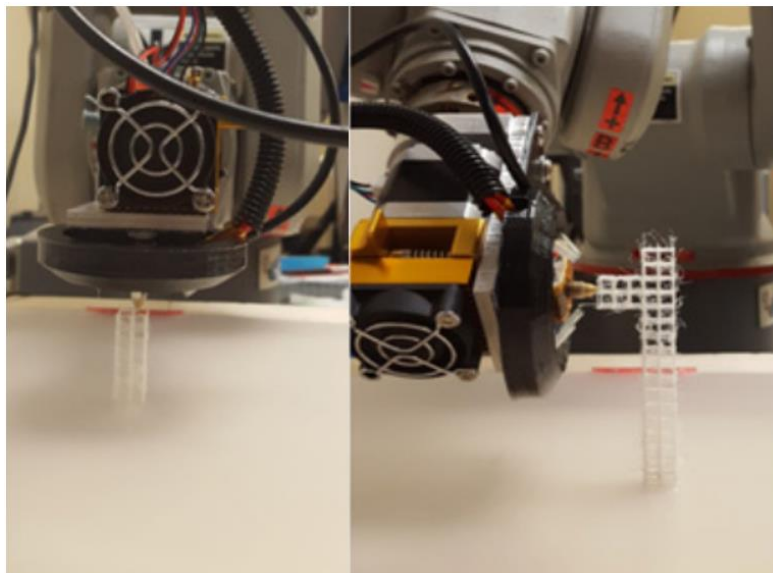


obr. 2-19: Ukázka synchronizace dvou robotů [25]

2.3.9 MotoMaker

Ishak se ve své práci [26] věnuje tvorbě výrobního systému pro tisk v různě orientovaných rovinách. Díky tomu se lze zbavit potřebných podpor a snížit tak dobu tisku. Výrobní systém

zvaný MotoMaker je tvořen robotickým ramenem a tiskovou hlavou. Pro ještě větší snížení výrobních časů se také věnuje tisku prostorových prutových struktur. Vytvářené struktury mají většinou krychlovitý tvar. Pruty kolmo k podložce vytahuje tak, že osa trysky extrudéru je shodná s osou prutu. Vrcholy takto vytištěných prutů jsou poté propojeny přemostěním, kdy osa trysky extrudéru je kolmo na tištěný prut. Zároveň provádí i tisk převisů, kdy jako podložka funguje už vytištěná část, celý proces je pak tedy otočen o devadesát stupňů (obr. 2-20).

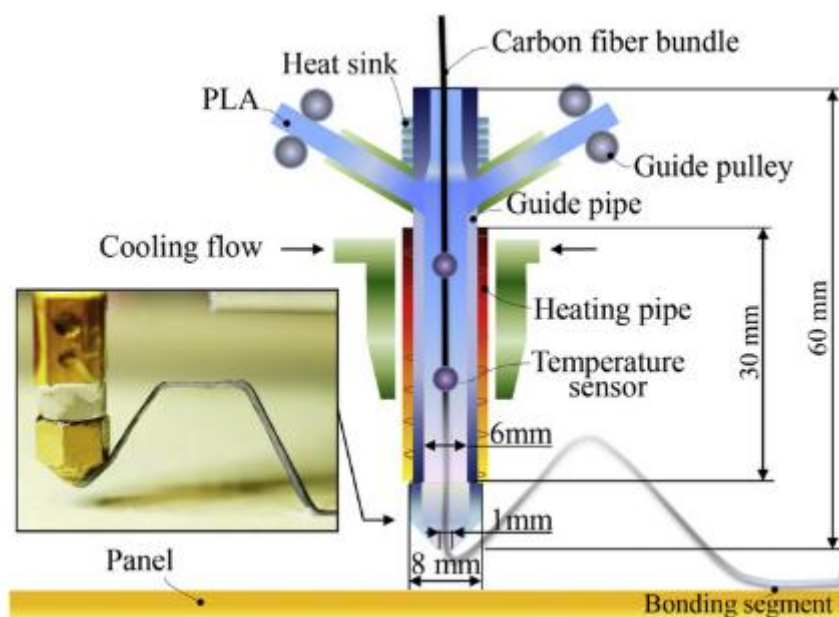


obr. 2-20: Tisk svislé části, tisk převisu [26]

Technologie využívá pro tisk trysku o průměru 0,48 mm, tištěné pruty tak mají tento průměr. Délka tištěných prutů je 5 mm. Pro dostatečné chladnutí prutu je využita rychlost tisku 1 mm/s, chladnutí je zároveň podpořeno ofukem pomocí stlačeného vzduchu.

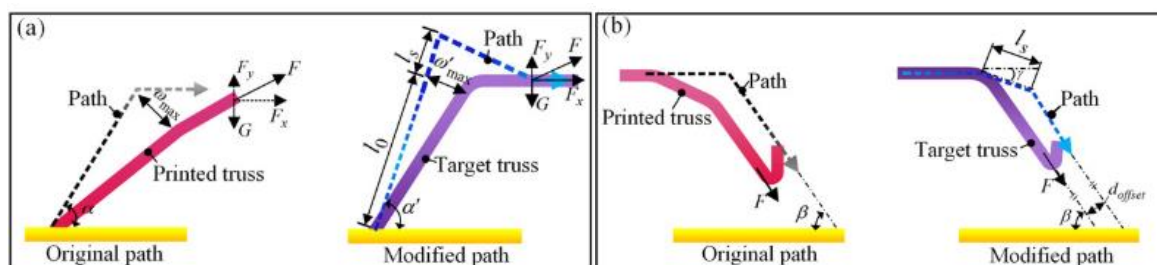
2.3.10 CFRTP

Liu řeší v článku [27] technologii Continuous Fiber Reinforced Thermoplastic (CRFTP), kdy se jedná o tisk vláken s jádrem vyztuženým pomocí uhlíkových vláken. Pomocí takovýchto vláken jsou vytvářeny prutové struktury, které slouží jako výplň sendvičových struktur. Pro tisk takovýchto prutů byla vytvořena speciální tisková hlava (obr. 2-21), která umožňuje obalení spojitého uhlíkového vlákna polymerním materiálem. Je použit materiál PLA, který je do extrudéru přiváděn pomocí dvou strun, tak aby došlo k lepšímu obklopení uhlíkového vlákna polymerní matricí. Chlazení je prováděno proudem vzduchu, vedeného symetricky kolem trysky. Celý tisk probíhá na tříosé delta tiskárně.



obr. 2-21: Tisková hlava umožňující vložení uhlíkového vlákna [27]

Práce se zaměřuje na geometrickou přesnost výroby prutů, ale především na co nejvyšší pevnost výsledné sendvičové struktury v tlakovém testu. V práci jsou řešeny i některé chyby tisku, jako například přetržení vlákna nebo odtržení základního vlákna od podložky. Oba tyto problémy jsou řešeny úpravou rychlosti posuvu, odtržení vlákna od podložky je navíc řešeno zvýšením extruze materiálu. Dalším velkým problémem je nepřesnost výroby způsobená deformací dostatečně nezchladlého materiálu. Toto je řešeno úpravou rychlosti, ale především modifikací trajektorie (obr. 2-22). Při nemodifikované trajektorii dochází k průměrné relativní chybě 20 % proti virtuálnímu modelu, maximální relativní chyba je pak 30 %. Po modifikaci trajektorie je průměrná relativní chyba necelé 2 % a maximální relativní chyba přesahuje mírně 3 %, dochází tak k výraznému zlepšení. Autor zmiňuje postupy pro úpravu trajektorie, ale už nezmiňuje procesní parametry, jako je rychlost tisku, rychlost extruze, a jejich další úpravy.



obr. 2-22: úprava trajektorie 3D tisku [27]

2.3.11 Mataerial

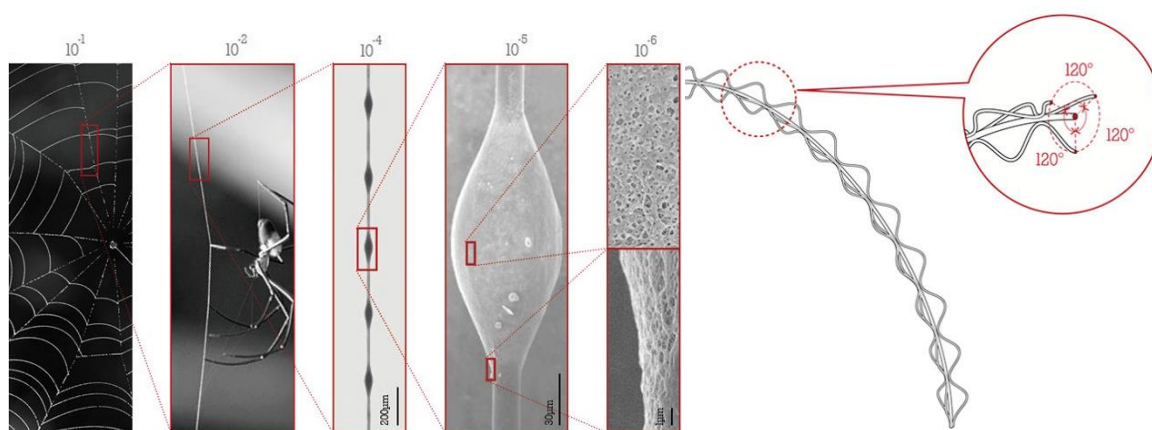
Na barcelonském Institute for advanced architecture of Catalonia vznikla pod vedením autora Jokiće nová metoda prostorového 3D tisku [28]. Ta využívá tiskovou hlavu velmi jednoduché konstrukce. Pro tisk je využito dvousložkových pryskyřic. Obě složky jsou umístěny v nádobách připevněných k ramenu robota. V tiskové hlavě následně dochází k jejich promísení a následnému vytlačení. Chemická reakce je umocněna přívodem tepla pomocí dvou horkovzdušných pistolí, dochází tak téměř k okamžitému tuhnutí. Díky tomu lze tisknout 3D křivky nezávisle na orientaci.



obr. 2-23: Technologie Mataerial [28]

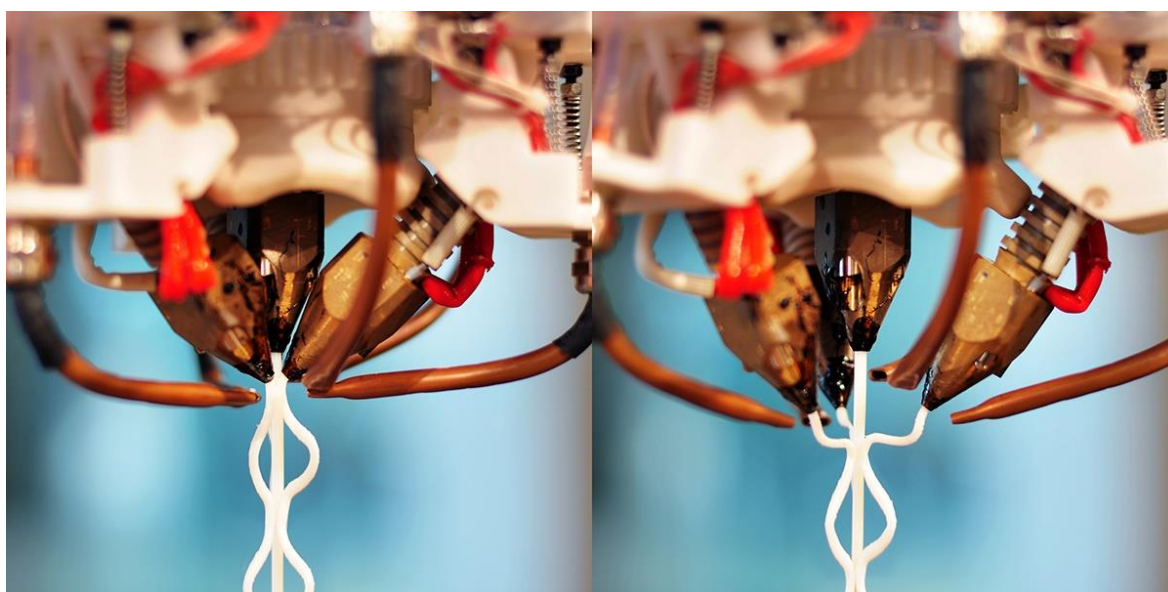
2.3.12 Robotic Extrusion

Robotic Extrusion od Lei Yu z Tshinghua University se při tvorbě prostorových struktur inspiroje v přírodě, konkrétně u pavoučích vláken (obr. 2-24)[29]. Na těch dochází k pravidelnému zesílení, které je v tomto experimentu realizováno pomocí přidavných vláken. Pro tvorbu prostorových vláken je použit materiál ABS.



obr. 2-24: Vlevo: Inspirace přírodou v pavoučích sítích, vpravo: tisknutá struktura [29]

Pro tvorbu takovéto struktury byl vytvořen speciální koncový efektor pro šestiosého robota. Ten je tvořen čtyřmi extrudéry. Středový extrudér je jediný pevný, další tři jsou pohyblivé. Tyto pohyblivé trysky se během trajektorie postupně otevírají a zavírají, jako na obr. 2-25. Celý proces je chlazen stlačeným vzduchem přivedeným k ústí trysek. Celý efektor je řízen na bázi Arduino, kdy každá tisková hlava má vlastní řízení přísunu materiálů a výhřevu.



obr. 2-25: Speciální tisková hlava v zavřené a otevřené poloze [29]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Podstatou řešené problematiky je tisknutelnost prostorových struktur. Tvorba těchto struktur má několik úskalí, jedná se především o nedostatečně popsanou přesnost výtisků, a metody jak jí dosáhnout. Dalšími problémy mohou být postup výstavby jednotlivých prutů, tak aby nedošlo ke kolizi, vzájemné napojení jednotlivých prutů a vhodné chlazení tištěného materiálu. Při výstavbě prutů se jedná především o dodržení jeho geometrie, kdy u svislých prutů se nemusí jednat o zásadní problém, avšak u prutů horizontálních (tvořících převis) se jedná o hlavní problém. Prut, který není rovný, ale prohýbá se, ztrácí své mechanické vlastnosti a je náchylnější k meznímu stavu vzpěrné stability.

Při napojení jednotlivých prutů k sobě je potřeba zajistit dostatečně pevný spoj. Ideálním případem je dosažení difuzního napojení. Tohoto je však obtížné dosáhnout a může tak dojít pouze ke kontaktnímu spoji. Při zatížení struktury vnějším působením nebo vlastní vahou dalšího nánosu pak může dojít k rozpadu spoje a následnému selhání celé struktury. Jak na výstavbu prutu v prostoru, tak na propojení prutů mají zásadní vliv vhodně nastavené procesní parametry, které vstupují do procesu tisku (obr. 3-1), především pak vhodné chlazení. Vzhledem k tomu, že bude využito komerčního materiálu a v rámci práce nebudou prováděny konstrukční změny na dostupném hardwaru, budou zkoumány především parametry tisku a parametry tištěného modelu.

Parametry robotického ramene a tiskové hlavy	Parametry tisku	Parametry materiálu	Parametry tištěného modelu
<ul style="list-style-type: none">• Rychlostní rozsah• Přesnost polohování• Rychlost reorientace• Průměr trysky• Tvar tiskové hlavy	<ul style="list-style-type: none">• Rychlost extruze• Rychlost tisku• Průtok chladicího vzduchu• Směr chlazení• Teplota trysky	<ul style="list-style-type: none">• Teplota skelného přechodu• Teplota tisku• Index toku taveniny• Hustota• Mechanické vlastnosti	<ul style="list-style-type: none">• Úhel prutu vůči podložce• Délka prutu• Průměr prutu• Vzájemné provázání prutů

obr. 3-1: Parametry vstupující do procesu

3.2 Analýza a zhodnocení řešerše

První 3D tištěné prostorové struktury byly tvořeny za účelem urychlení procesu návrhu. Toho bylo dosaženo snížením výrobního času, kdy tvorba modelu pomocí prostorové struktury je rychlejší než tvorba plného modelu. Hlavní využití tyto struktury však našly

v architektuře a uměleckých instalacích, kdy se nejčastěji jedná o velkorozměrové aplikace. Ty lze s výhodou vytvářet pomocí šestiosého robota, díky jeho velkému pracovnímu prostoru. Tisk pomocí šestiosého robota sebou nese i další výhodu, a to možnost natáčení tiskové hlavy a tak změna silového rozložení při tisku, tuto možnost však většina autorů nevyužívá.

Pro tisk prostorových struktur je nutné zvolit vhodný materiál. Někteří autoři využívají pro tisk speciální materiály [21, 28], většina však využívá standardní tiskové struny z materiálů PLA nebo ABS. Výjimku také tvoří práce [27], která sice využívá materiál PLA, avšak v jádru je vyztužen kontinuálním uhlíkovým vláknem. Uhlíkové vlákno je zde především z důvodů zvýšení mechanických vlastností, na které se práce zaměřuje. Z používaných materiálů se jako vhodnější zdá PLA, které má nižší teplotu skelného přechodu, lze tak snadněji dosáhnout kvalitního napojení, díky čemuž se mechanické vlastnosti celé struktury zvýší. Zároveň má nižší smrštitost, bude tak snadnější dosáhnout přesného tisku.

Většina prací se zabývá samotnou tisknutelností, nikoli však nalezením vhodných procesních parametrů, z tohoto důvodu procesní parametry často ani neuvádí. Práce, které procesní parametry uvádějí, uvádí pouze některé, jako například rychlost posuvu, případně tlak stlačeného vzduchu pro chlazení. Rychlost posuvu se pohybuje od 1 do 3 mm/s při tvorbě prutu. Společným faktorem, se kterým pracuje většina autorů, je změna rychlosti v průběhu tvorby prutu, kdy na jeho začátku a konci je rychlost odlišná než při tvorbě jeho hlavní části. Mueller [17] využívá rychlost výrazně vyšší (30 mm/s), v jeho případě jde však o tvorbu velmi krátkých prutů s malým průměrem.

V případě chlazení se pohybuje tlak stlačeného vzduchu shodně kolem jednoho baru. Rozdíl nastává v umístění trysek se stlačeným vzduchem. Někteří autoři se snaží umístit trysky se stlačeným vzduchem co nejbližší k trysce extrudéru [18], jiní naopak dosahují nejlepší výsledků s tryskou umístěnou v určité vzdálenosti od trysky extrudéru [25]. Všichni se ale snaží směřovat stlačený vzduch ihned za trysku extrudéru, tak aby docházelo k chlazení vytištěného materiálu ihned po jeho extruzi. Problém může tvořit ochlazování nejen vytištěného materiálu, ale i trysky extrudéru. Výjimku tvoří tisková hlava AiMaker společnosti AiBuild, která jako jediná nevyužívá stlačeného vzduchu, ale materiál chladí pomocí čtyř ventilátorů, jako jediní však využívají temperovanou komoru. Všichni autoři se však shodují, že dostatečné chlazení je zásadní pro tisknutelnost prostorových struktur.

Jedním z problémů při tisku prostorových struktur je propojení jednotlivých prutů. Tento problém je často řešen změnou procesních parametrů v okamžiku napojování. Většina autorů řeší tento problém krátkým zastavením v počátečním a koncovém bodě prutu, kdy ve většině případu je vypnut přívod chladicího vzduchu, tak aby se materiál, na který se tisknutý prut napojuje, dostatečně prohrál a vzniklo tak kvalitní napojení. Další zmiňovanou metodou je přeextrudování v místě spoje, čímž se vytvoří tvarový spoj bez nutnosti nataveného spoje.

Z rešerše dále vyplývá, že pro tisk geometricky přesných prutů je vhodné modifikovat dráhu tisku, tak aby úprava dráhy kompenzovala pokles prutů, který není dostatečně zchlazený. Jedná se především o tisk horizontálních prutů a prutů vedených pod úhlem. Modifikaci dráhy je třeba řešit také při požadavku ostrého rohu při změně směru trajektorie. Potřebné modifikace mírně popisuje Mueller [17], výrazně více se jim pak věnuje Liu [27], kdy díky vhodné korekci dráhy snižuje chybu tisku na 10 % chyby bez korekce. Autor bohužel uvedené korekce nepopisuje dostatečně pro jejich možné replikování.

Dalším problémem je řešení kolizí již vytištěného materiálu s tiskovou hlavou. Z rešerše vyplývají požadavky na tiskovou hlavu, kde se jedná především o její kompaktnost. Důraz je kladen také na geometrii trysky extrudéru. Vnitřní úhel špičky by měl být co nejmenší, aby byla tryska co nejštíhlejší. Tyto požadavky jsou částečně splněny dostupnou tiskovou hlavou, která je současně používána na robotickém pracovišti. Problematiku kolize lze také vyřešit pomocí vhodného postupu tisku jednotlivých prutů, tomu se věnuje Huang v [18, 19]. Pro vhodné napolohování tiskové hlavy a ideální pořadí tisku prutu využívá komplikované algoritmy. Tato práce se však problematice řídicích algoritmů nevěnuje. Geuvera [25] tento problém řeší pomocí opakující se struktury jednoduchého tvaru, kterou staví postupně, a nemůže tak dojít ke kolizi.

tab. 3-1: Shrnutí současného stavu poznání

Studie	Materiál	Rychlost tisku (mm/s)	Chlazení
WirePrint [17]	ABS	až 30	2 trysky, ve spoji vypnuto
FrameFab [30]	ABS	1,3÷9	2 trysky, 0,2 bar, ve spoji vypnuto
Mesh-Mould [23]	PLA	4	6 trysek
BranchTechnology [21]	granulát	-	vzduch veden tryskou extrudéru
AiBiuld [20]	-	-	4 ventilátory kolem trysky
FOAM [25]	PLA (ABS)	3	4 trysky, 1bar
CFRTP [27]	CFR-PLA	-	-
MotoMaker [26]	PLA	1	4 trysky
Iridescence Print [24]	ABS	-	Stlačený vzduch

Studie	Způsob napojení v uzlu	Zaměření studie
WirePrint [17]	1s pauza v uzlu	Snížení výrobních časů
FrameFab [30]	2 s pauza, 30% extruze	Tvorba algoritmu pro tvorbu trajektorie
Mesh-Mould [23]	-	Aplikace ve stavebnictví
BranchTechnology [21]	-	Komerční řešení, architektonické instalace
AiBuild [20]	-	Komerční řešení, architektonické instalace
FOAM [25]	2÷4 s pauza v uzlu	Konstrukce tiskové hlavy, nezávislost tisku na orientaci podložky
CFRTP [27]	-	Tvorba lehkých sendvičových struktur
MotoMaker [26]	-	Tvorba výrobního zařízení s možností různě orientovaného tisku
Iridescence Print [24]	Speciální strategie (obr. 2-15)	Výroba umělecké instalace

3.3 Cíl práce

Hlavním cílem práce je stanovit procesní parametry a tiskové strategie umožňující opakovatelnou tvorbu geometricky kvalitních prostorových prutů bez nutnosti podpory v celé délce nánosů. U vytištěných prutů by zároveň mělo být zajištěno jejich kvalitní propojení a maximální odchylka do jednoho milimetru od ideálního tvaru. Tohoto cíle lze dosáhnout tak, že budeme znát vliv jednotlivých procesních parametrů na výsledné vlastnosti vytištěné prutové struktury. Dosažení cíle lze zkontrolovat pomocí porovnání 3D skenu vytištěného dílu a virtuálního modelu.

Dílními cíli potřebnými pro dosažení hlavního cíle práce jsou následně:

- Návrh experimentu vlivů zkoumaných parametrů
- Tvorba skriptu pro generování řídicího programu
- Vytvoření metodiky pro vyhodnocení přesnosti tištěných vzorků.
- Návrh a otestování vhodných procesních parametrů a tiskových strategií

3.3.1 Vědecká otázka a hypotézy

Vědecká otázka:

Které procesní parametry jsou klíčové pro tisknutelnost, přesnost tisku a kvalitní spojení prutových struktur při robotické aditivní výrobě?

Hypotéza 1:

Parametry nejvíce ovlivňující vystavitelnost budou parametry spojené s chlazením. Především tedy množství vzduchu a vhodné napolohování ofukové trysky.

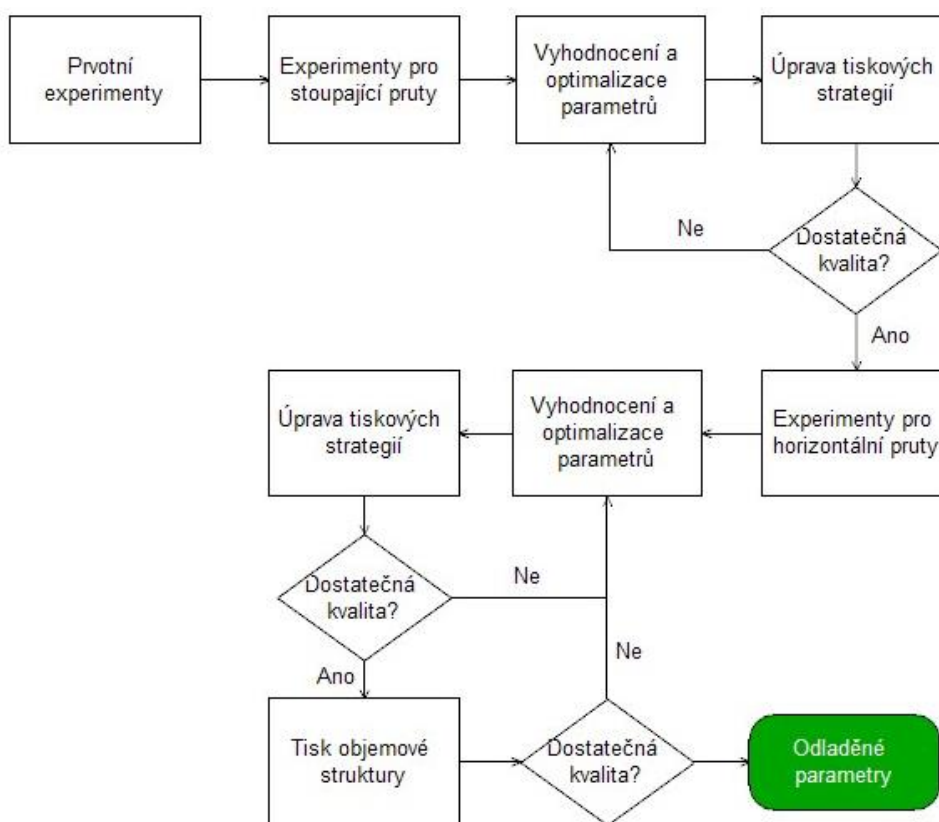
Hypotéza 2:

Pomocí správné orientace hlavy lze dosáhnout zvýšení přesnosti tisku.

4 MATERIÁL A METODY

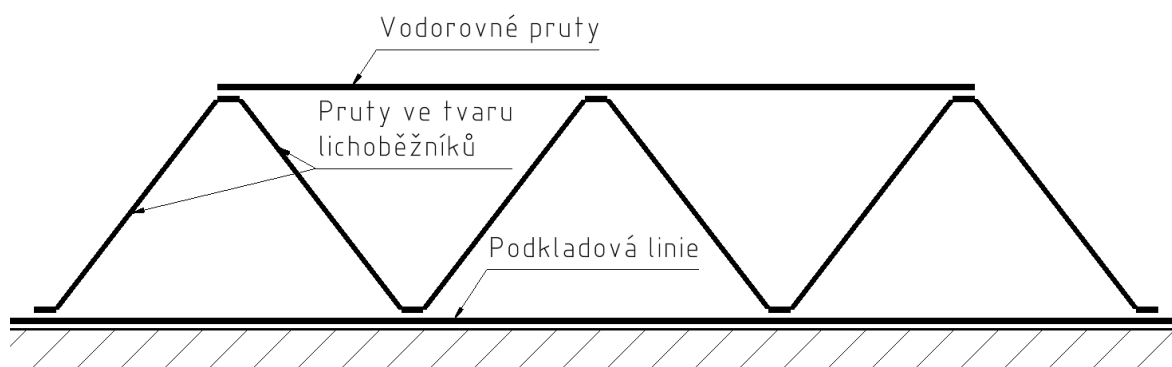
4.1 Postup řešení

Řešení diplomové práce se skládá z několika zásadních kroků. Tyto kroky po sobě následují logicky tak, aby ve výsledku bylo dosaženo cíle diplomové práce, tedy kvalitně vystavěných prostorových struktur. Jednotlivými kroky bude zjištění hlavních procesních parametrů a jejich závislostí pro tisk co nejkvalitnějších prutů a jejich spojení. Dále pak návrh a úprava tiskových strategií pro zvýšení kvality a geometrické přesnosti. Takto navržené parametry a strategie budou ověřeny na objemovém modelu, tak aby se odhalily jejich nedostatky, které budou následně vyřešeny.



obr. 4-1: Postup řešení

Celý postup řešení je rozdělen do tří částí. Jednotlivé části pak vychází ze základního experimentálního modelu (obr. 4-2). Prvním krokem je tisk prutů ve tvaru lichoběžníku, vyplňujících značnou část objemu. Dalším krokem je tisk horizontálních prutů, propojujících vrcholy již vytištěných lichoběžníkových prutů. Posledním krokem je uspořádání takto získaných struktur a jejich vzájemné provázání do objemových celků.



obr. 4-2: Základní experimentální model

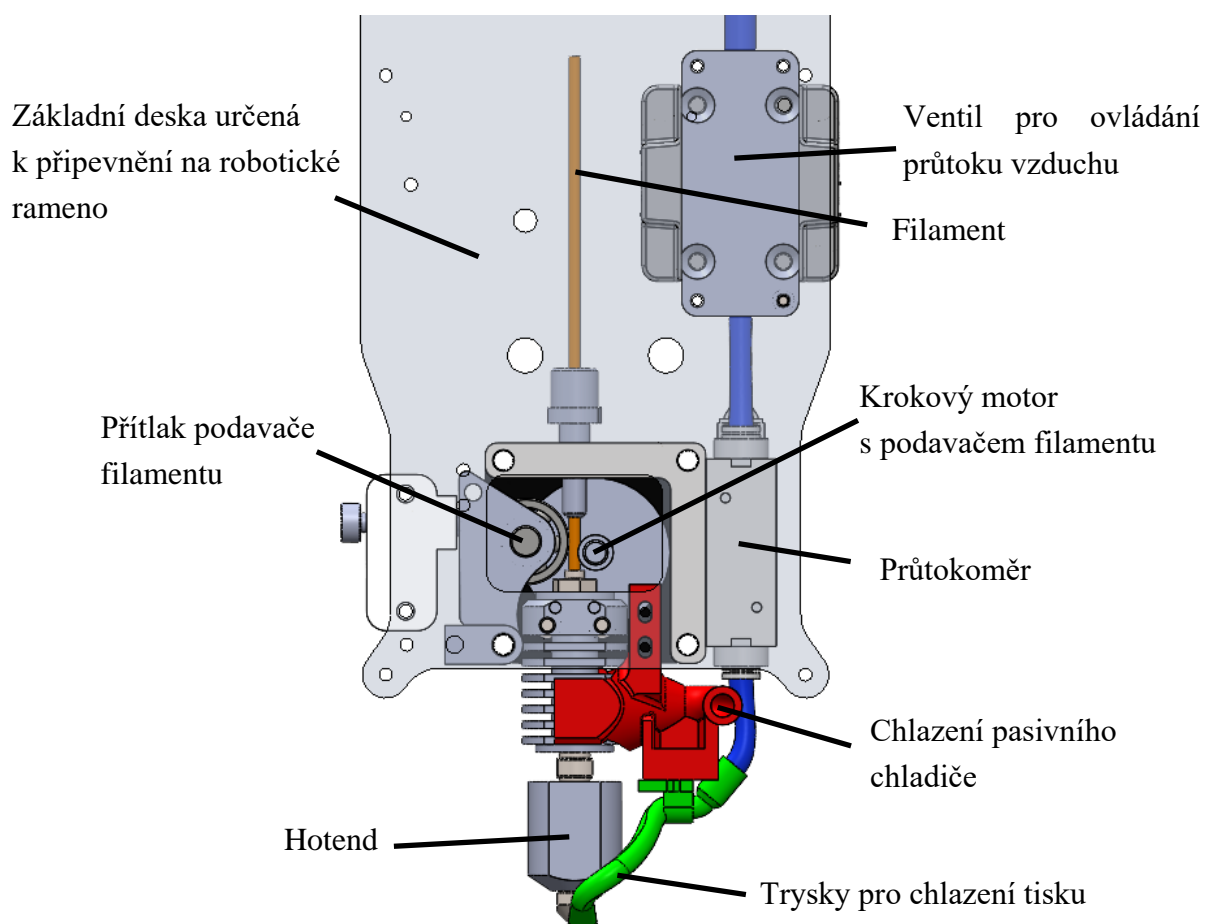
4.2 Použité zařízení

4.2.1 Tisková hlava

Pro experimentální tisk bude využita speciální tisková hlava (obr. 4-3) vyvinutá na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně. Celá tisková hlava je koncipovaná jako koncový efektor robota. Základnu tiskové hlavy tvoří deska, k níž jsou připevněny všechny potřebné komponenty. Tato základna slouží zároveň pro připevnění tiskové hlavy k přírubě robota. Hlavními částmi je podávací mechanismus filamentu, hotend a zařízení pro proudění vzduchu. Celá tisková hlava je řízena elektronikou umístěnou v externím boxu. Signál je do hlavy přiveden pomocí kabelu vedeném po rameni robota. Materiál je do tiskové hlavy dodáván z filamentové cívky uložené na robotickém rameni.

K tavení materiálu dochází pomocí topných patron uložených v hotendu extrudéru. Natavený materiál, je vytlačován tryskou o průměru 2 mm. Pro zamezení přenosu tepla do zbytku tiskové hlavy je nad tryskou umístěn pasivní chladič. Pro zvýšení jeho výkonu je navíc chlazen stlačeným vzduchem. Ten je do tiskové hlavy přiváděn s rozvodů v laboratoři. Stlačený vzduch se také využívá pro chlazení nánosu. V případě chlazení nánosu však je vzduch z rozvodu vedený do říditelného ventilu, umístěného na tiskové hlavě, z kterého pokračuje do průtokoměru. Díky tomuto průtokoměru lze odečítat přesné množství vzduchu, které proudí na nános. Z průtokoměru je vzduch veden do speciálně vyrobené ofukové trysky, která se dělí do dvou trysek vedoucích k ústí trysky extrudéru, tak aby byl tištěný materiál co nejlépe chlazen. Tisková hlava tak umožňuje regulaci extrudovaného materiálu, teploty trysky a množství stlačeného vzduchu pro chlazení. Díky možnosti propojit řídicí jednotku tiskové hlavy s řídicí jednotkou robota pomocí sériové komunikace, lze ovládat tiskovou hlavu pomocí ovládacího panelu robota. Parametry lze také řídit v průběhu tisku pomocí příkazů, v kódu řídicího programu. Tisková hlava byla již v minulosti využívána pro

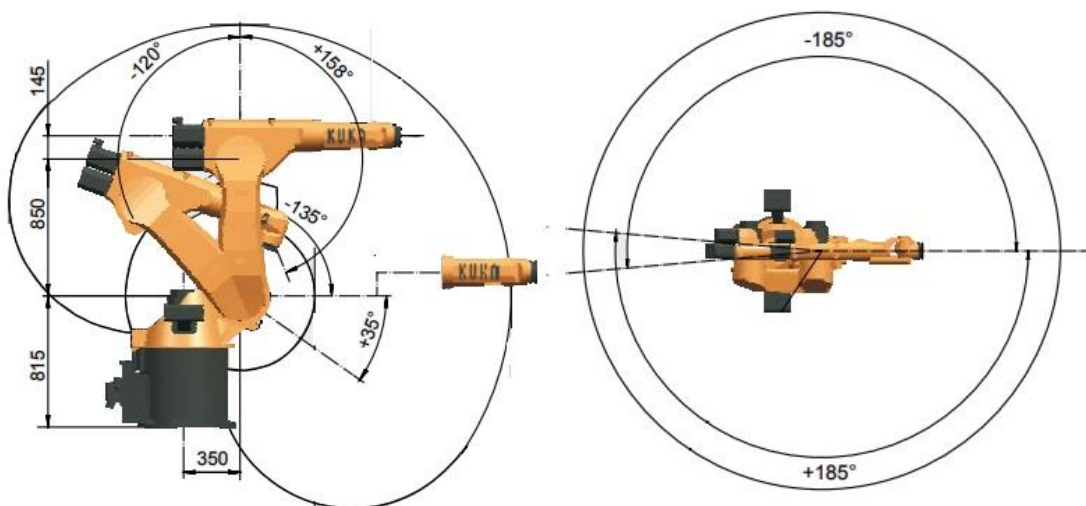
experimentální bezpodporový tisk [14, 15]. Nejednalo se však o tisk prostorových struktur, ale o tisk převisů vrstvu po vrstvě.



obr. 4-3: Tisková hlava

4.2.2 Šestiosé robotické rameno

Pro polohování tiskové hlavy bude využito průmyslového robota Kuka KR 60 HA. Jedná se o robotické rameno se zvýšenou přesností a nosností šedesát kilogramů. Přesnost polohování je $\pm 0,05$ mm [31]. Maximální dosah ramene je 2 033 mm. Díky velikosti pracovního prostoru a zvýšené přesnosti je rameno vhodné pro opakovatelnou výrobu a zároveň stavbu rozměrných struktur. Pracovní rozsah robota lze vidět na obr. 4-4.



obr. 4-4: Pracovní rozsah robota [32]

4.2.3 3D skener

Pro získání přesné geometrie vytištěných modelů je použita technologie 3D skenování. Konkrétně se jedná o skener ATOS TripleScan 8M. Skener umožňuje velký rozsah měřících objemů, s vysokou přesností a rozlišením. V rámci diplomové práce probíhalo měření s optikou MV170. Pro potřeby skenování bylo využito kombinace skeneru a rotačního stolu dostupného v laboratoři optické digitalizace.



obr. 4-5: ATOS TripleScan [33]

tab. 4-1: Parametry skeneru ATOS TripleScan 8M [34]

Měřící objem	170 x 130 x 130 mm
Měřící vzdálenost	490 mm
Rozlišení	0,055 mm
Přesnost měření	0,002 mm

4.3 Použitý materiál

Na základě rešerše byl pro tisk vybrán materiál PLA, který nejvíce splňuje potřebné požadavky. Konkrétně se jedná o materiál PLA Extrafill od společnosti Fillamentum. Vlastnosti materiálu jsou uvedeny v tab. 4-2.

tab. 4-2: Vlastnosti použitého materiálu [35]

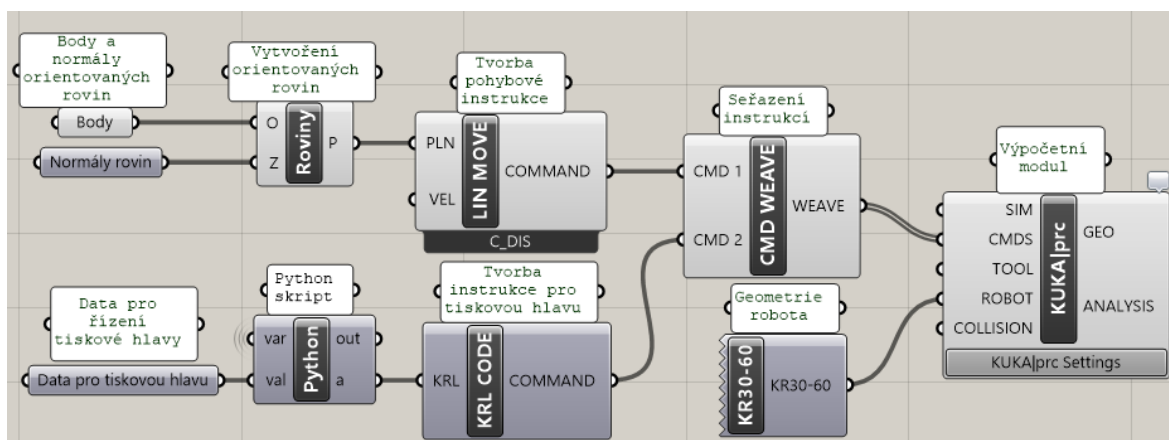
Vlastnost	Hodnota
Hustota	1,24 g/cm ³
Index toku taveniny	6g/10min
Pevnost v tahu	53 MPa
Teplota skelného přechodu	55÷60 °C
Doporučená teplota tisku	190÷215 °C

4.4 Generování řídicího programu

Řídicí program byl do robotického ramene dodáván v podobě SRC-kódu. Ten byl vygenerován v doplňkovém modulu Grasshopper s pluginem Kuka|prc softwaru Rhino 6. Tento plugin vypočítává kinematiku jednotlivých os na základě dodaných vstupů. Do výpočetního modulu je nutné dodat polohu a natočení nástroje k přírubě robota a polohu a natočení báze (tiskové podložky) k patě robota. Tyto data lze získat přímo z řídicího systému robota.

Pro generování trajektorie je potřeba vycházet z bodů dané trajektorie. Jednotlivé body trajektorie musí být ve skriptu seřazeny v pořadí, v jakém jimi má robot projet. V těchto bodech je nutné vygenerovat orientované roviny. Orientace roviny určuje orientaci nástroje. V našem případě tvoří normála roviny osu trysky extrudéru. Následně je nutné zvolit vhodný druh pohybu mezi jednotlivými polohami. Pro tento případ přímých prutů je nejvhodnější lineární pohyb, tedy přesunutí z jedné polohy do druhé po přímce. Pokud by mělo dojít ke změně orientace nástroje, výpočetní modul rozloží změnu orientace plynule po celé délce pohybu. Součástí řídicího programu jsou také řídicí instrukce pro tiskovou hlavu. Ty jsou také generovány v prostředí Grasshopper, a přetvořeny na příkazy pomocí speciálně vytvořeného Python skriptu. Konkrétně se jedná o rychlost extruze, množství chladicího vzduchu, rychlost změny množství chladicího vzduchu a instrukce pro retrakce materiálu. Vygenerované instrukce pro tiskovou hlavu jsou vhodně vloženy mezi pohybové instrukce. Všechny instrukce jsou následně vloženy do výpočetního modulu. Výpočetní modul umožňuje dále vložení modelu nástroje a robota pro zobrazení simulace. Dále umožňuje vložení překážek, které se mohou vyskytovat v pracovním prostoru robota, tak aby nemohlo

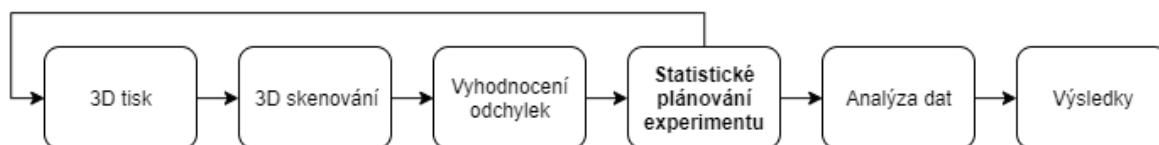
dojít ke kolizi robota s těmito překážkami. Při správném zadání všech vstupních parametrů, výpočetní modul vygeneruje SRC-kód, který je následně přesunut do řídicí jednotky robota. Zjednodušenou podobu skriptu použitého pro generování řídicího programu lze vidět na obr. 4-6.



obr. 4-6: Zjednodušený skript pro generování trajektorie

4.5 Experimenty pro zjištění procesních parametrů

Postup experimentů se řídí plánem dle obr. 4-1. Jednotlivé experimenty následně sledují podobný postup. Prvním krokem bude návrh experimentální série pomocí metody statistického plánování experimentu (obr. 4-7). Takto navržená série vzorků bude následně vytištěná pomocí speciální tiskové hlavy a robotického ramene. Vytištěné a označené vzorky budou poté naskenovány pomocí 3D skeneru a ze získaných dat budou vyhodnoceny odchylky výtisků oproti ideálnímu tvaru pomocí softwaru GOM Inspect. Takto získaná data budou pomocí metody statistického plánování experimentu a programu Minitab analyzována pro zjištění vlivu a významnosti zkoumaných parametrů a jejich kombinací.



obr. 4-7: Postup jednotlivých experimentů

4.5.1 Statistické plánování experimentu

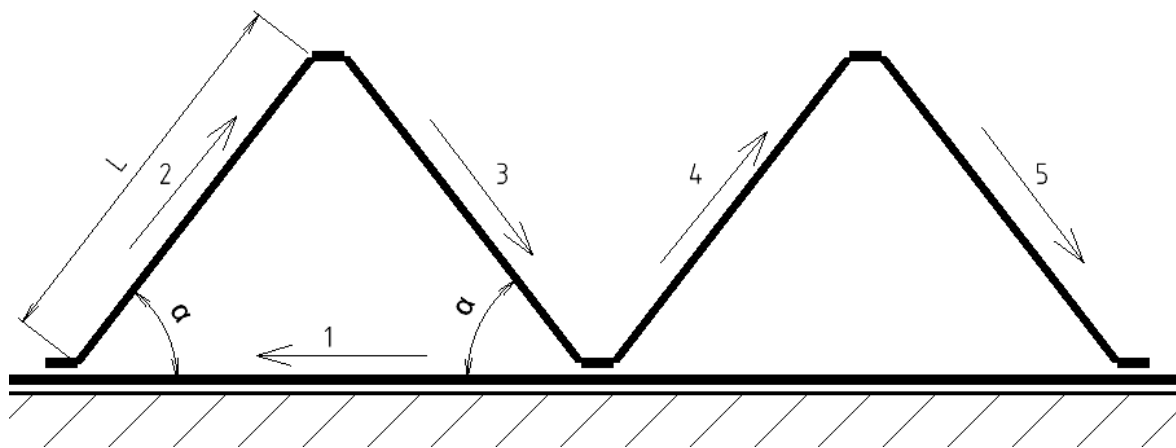
Pro zjištění vhodných parametrů bude využito metody statistického plánování experimentu (Design of Experiments – DoE). Pro procesy, do kterých vstupuje větší množství parametrů, je tato metoda vhodná především proto, že efektivně snižuje počet nutných kombinací. Dále umožňuje vytvoření vzájemných závislostí parametrů a nalezení optimální kombinace pro

co nejlepší výsledek dle zadaných požadavků. Výhodou je také zjištění váhy jednotlivých parametrů, díky čemuž lze zjistit jak je daný parametr důležitý pro dosažení požadovaného výsledku.

Pro navržení série je nutné znát její okrajové podmínky, hodnoty parametrů, pro které lze experiment považovat za úspěšný, v případě prutových struktur, je nutné stanovit podmínky, při kterých dojde k postavení struktury, tak aby mohla být vyhodnocena. Tyto okrajové podmínky budou stanoveny na základě prvotních experimentů. Pro návrh a vyhodnocení experimentu bude využit statistický software Minitab. Výsledkem metody bude statistický model. Ten bude umožňovat predikci výsledků na základě vložených vstupů, a zároveň nalezení vhodných vstupních parametrů, na základě požadovaných výstupů. Správnost modelu bude také nutné experimentálně ověřit.

4.5.2 Pruty ve tvaru lichoběžníků

Pro hledání vhodných procesních parametrů prutů ve tvaru lichoběžníků bude proveden jednoduchý experiment (obr. 4-8). V prvním kroku bude vytištěna podkladová linie, tak aby byla zajištěna dostatečná přilnavost k podložce. Na podkladovou linku bude následně vytištěna struktura ve tvaru rovnoramenného lichoběžníku. Zkoumanými parametry budou také délka ramen lichoběžníku a vnitřní úhel mezi rameny a spodní základnou. Pro horní základnu a mezeru mezi jednotlivými lichoběžníky byla zvolena konstantní délka a to 2,5 mm. Průměr prutu bude poté vždy shodný s průměrem trysky, tedy 2 mm. Pokud bude požadován tisk několika vzorků se stejným nastavením, budou tyto vzorky vytištěny za sebou, bez přerušení tisku.



obr. 4-8: Experiment pro lichoběžníkové pruty

Okrajové podmínky byly zjištěny pomocí prvotních experimentů, jejichž cílem bylo zjištění hranic, za kterými už nelze strukturu bezpečně postavit. Důležité bylo také to, aby struktura byla vytavitelná i při „nejhorší“ kombinaci parametrů. První hodnoty vycházely z rešerše, limity následně byly zúženy nebo rozšířeny na základě těchto experimentů. Souhrn zjištěných okrajových podmínek pro DoE jsou uvedeny v tab. 4-3.

Teplota trysky vychází z materiálového listu. Při experimentech bylo zjištěno, že tisk při teplotě na horní hranici je mírně lepší, proto bude u všech experimentů využita teplota 215 °C. Maximální rychlost posuvu robota byla stanovena na 2,5 mm/s. Při vyšších rychlostech nedocházelo k dostatečnému zchlazení prutu, a měkký prut nedokázal udržet tvar. Dalším limitem maximální rychlosti je krokový motor extrudéru. Motor je potřeba provozovat v určitých otáčkách, protože při vyšších by mohlo dojít ke snížení krouticího momentu, který by nemusel stačit pro extruzi materiálu. Minimální rychlost byla stanovena tak, aby byla udržena určitá produktivita tisku. Z experimentů také vyplynulo, že ideální poměr rychlosti extruze a rychlosti posuvu je 1:1. Rychlost extruze se následně vypočítá pomocí objemového průtoku.

Pro průtok vzduchu byla zjištěna minimální hodnota 27 l/min, při nižších hodnotách už nedocházelo k dostatečnému chlazení prutů. Horní limit byl stanoven na 60 l/min. Při vyšších hodnotách docházelo k příliš velkému ovlivnění tištěných prutů proudem vzduchu. Vyšší průtoky také způsobovali ochlazování trysky extrudéru a následně zchladnutí materiálu ještě v trysce, což vedlo k ucpání trysky. Tlak v okruhu ofukového vzduchu je regulován na hodnotu 0,3 MPa.

Geometrie lichoběžníku, je dána délkou ramene a úhlem ramene od podložky. Pro délku prutu byl zvolen rozsah 25 až 35 mm. Při menších délkách může při vyšší rychlosti tisku dojít k nedostatečnému zchladnutí v patě prutu a poté k jeho významné deformaci při změně směru tisku. U delších prutů pak dochází ke zvyšování jejich štíhlosti a tak ke snížení mechanických vlastností celé struktury. Pro úhel prutu od podložky neexistuje reálně žádné omezení, lze tak tisknout pruty s téměř nulovým úhlem, až pruty s úhlem 90 °, tedy svislé pruty. Pro účely experimentu byl zvolen maximální úhel 75 °, tak aby nedocházelo k překrývání trajektorií. Jako minimální úhel byl poté zvolen úhel 45 °, který zajišťuje smysluplné a efektivní vyplnění objemu.

Parametr náklonu tiskové hlavy je definován procentuálním rozsahem od 0 do 100 %. K tomuto bylo přistoupeno z důvodu, že rozsah úhlu β je závislý na úhlu prutu α . Úhel β je definován v rovině nánosu jako úhel od svislé osy (kolmé k podložce) ve směru tisku (obr. 4-9). Vždy pak platí, že β_{\max} (naklopení 100 %) je 45°. Toto je dáno geometrií tiskové hlavy, kdy při překročení tohoto naklopení by došlo ke kolizi s podložkou, nebo již vytištěným nánosem. Minimální úhel (naklopení 0 %) je pak definován vztahem:

$$\beta_{\min} = \alpha - 45^{\circ}$$



Procesní parametr	Hodnoty
Teplota trysky	215°C
Rychlost posuvu	1,5÷2,5 mm/s
Poměr extruze a rychlosti posuvu	1:1
Průtok vzduchu pro ofuk nánosu	27÷60 l/min
Délka prutu	25÷35 mm
Natočení tiskové hlavy	0÷100 %
Úhel stoupání prutu od podložky α	45°÷75°

48

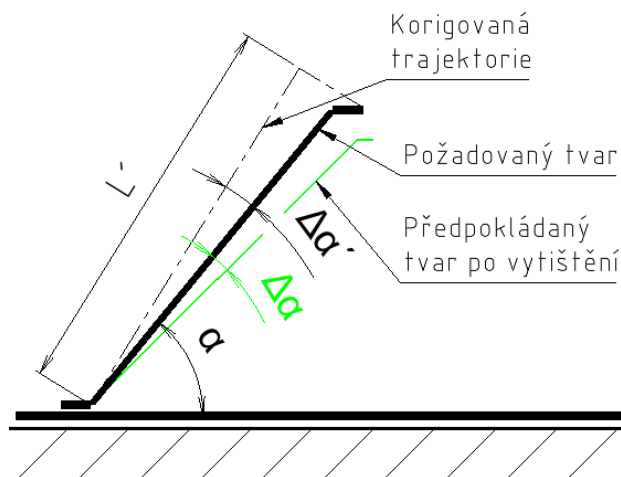
4.5.3 Úprava tiskových strategií

Pokud po zjištění co nejvhodnějších procesních parametrů nebudou pruty dosahovat dostatečné kvality a geometrické přesnosti, bude nutné tyto nedokonalosti minimalizovat pomocí úpravy tiskových strategií. Takovými úpravami budou korekce drah a změny procesních parametrů v průběhu tisku.

Jednou z možných tiskových strategií je vhodně nastavené zpomalení či úplné zastavení ve vrcholu, tak aby prut stihl dostatečně zchladnout a držel tvar, než se změní směr nánosu. Při nedostatečném zchladnutí může dojít k ohybu nezchladlé části a tak k vytvoření výrazné deformace, která je nežádoucí.

Další možnou úpravou bude změna množství chladicího vzduchu v průběhu tisku. Tato změna nemusí mít pozitivní vliv na přesnost, avšak může výrazně pomoci pevnosti ve spojích struktury. Z rešerše vychází, že je vhodné chlazení v místě uzlu snížit, případně úplně vypnout.

Další úpravou bude korekce dráhy, tak aby korigovala pokles nezchladlého prutu. Prut tedy bude vytištěn nad svou pozicí, tak aby po poklesu skončil na požadovaném místě (obr. 4-10). Myšlenka těchto korekcí je založena na korekcích od Liu [27]. Zkoumaným parametrem bude úhel $\Delta\alpha'$, který bude vycházet z úhlu poklesu $\Delta\alpha$. Dále bude nutné zjistit vhodné prodloužení L' . Při vhodné kombinaci těchto parametrů dojde k vychladnutí prutu na požadovaném místě.

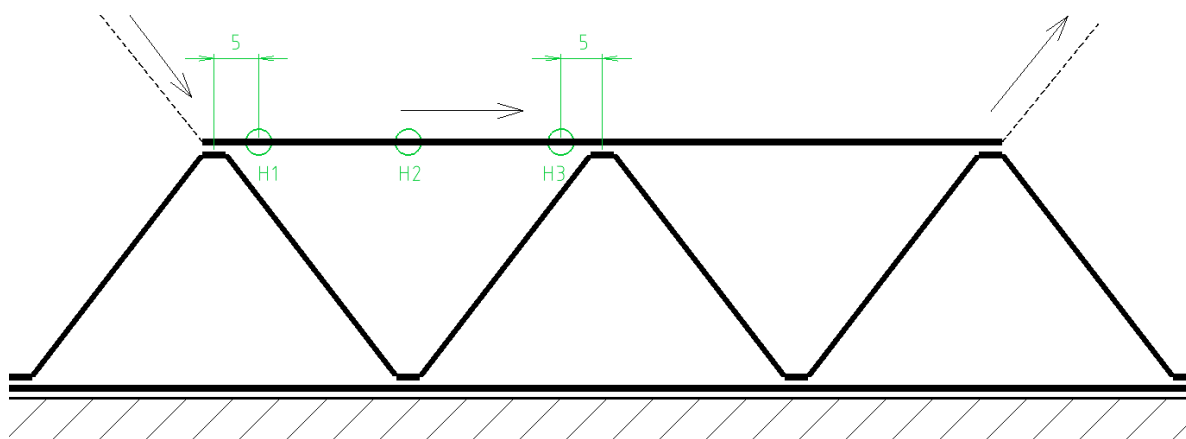


obr. 4-10:Korekce trajektorie

4.5.4 Vodorovné pruty

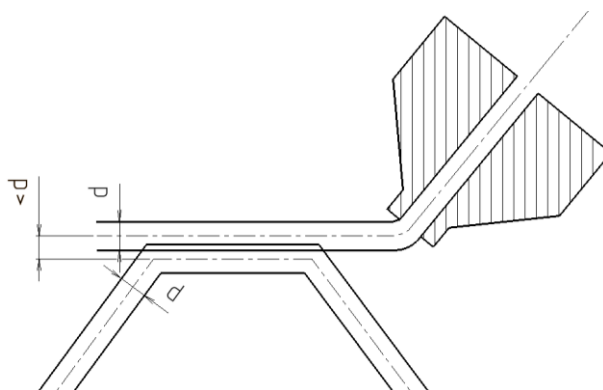
Dalším krokem bude zjištění vhodných procesních parametrů pro vodorovné pruty. Tyto parametry je možné zjišťovat až po zajištění dostatečné přesnosti lichoběžníkový prutů. Hlavním důvodem je nutnost napojení na již vytištěnou část, kdy při nepřesně vytištěném lichoběžníku by nemuselo dojít k propojení, případně by nepřesnost lichoběžníků mohla

ovlivnit přesnost vodorovného prutu (obr. 4-11). Výhodou tisku na předchozí strukturu je fakt, že na třech lichoběžnících je možné sledovat všechny možné stavy. Na prvním je to napojení nájezdem na vrchol, u druhého přejetí vrcholu a u třetího napojení při odjezdu. Sledována bude kvalita napojení v jednotlivých uzlech a prohnutí prutu v několika bodech po délce. Obdobně jako u stoupajících prutů to budou odchylky 5 milimetrů od začátku a konce prutu a ve středu prutu. Pro zvýšení přehlednosti budou tyto odchylky značeny písmenem H. Tyto data budou obdobně jako u stoupajících prutů vyhodnocována pomocí technologie 3D skenování. Postup pro získání vhodných parametrů bude obdobný jako u stoupajících prutů, s tím rozdílem, že jako vstupní hodnoty budou brány data získána z experimentů pro lichoběžníkové pruty.



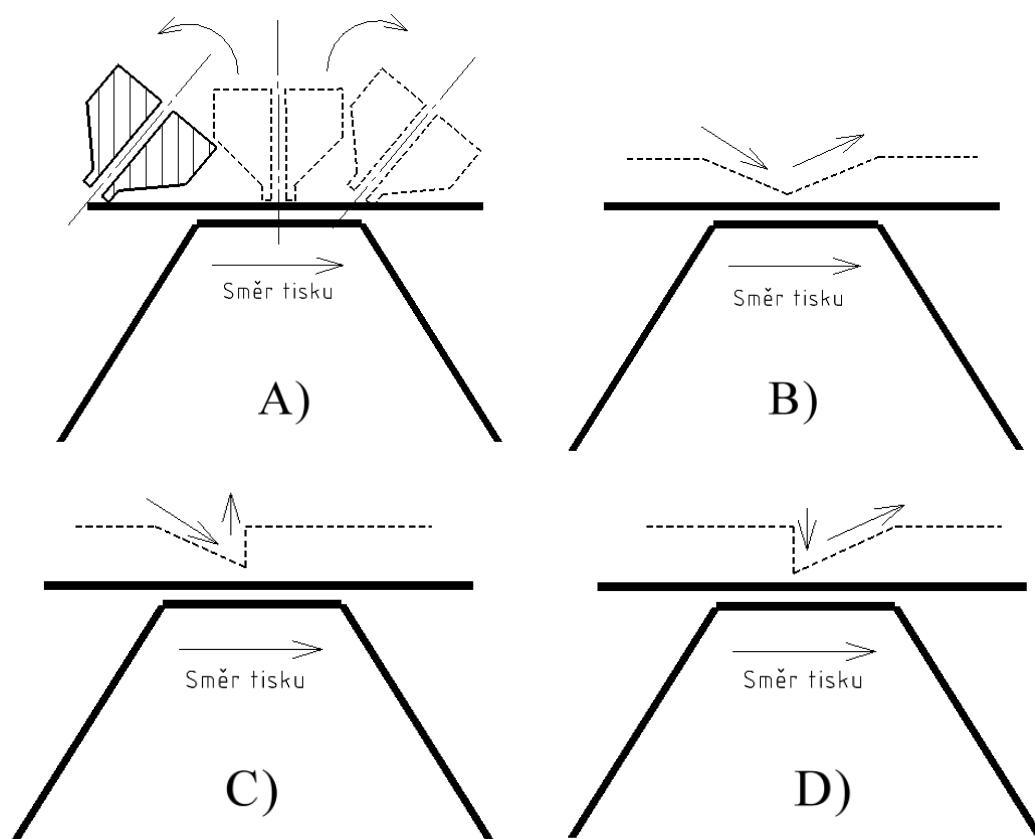
obr. 4-11: Tisk vodorovného prutu

Dalším důležitým zkoumaným jevem bude způsob napojení na již vytištěnou část. Nejjednodušším způsobem je prosté přejetí s mírným překryvem tištěného a vytištěného materiálu (obr. 4-12). Dojde tak k napojení materiálu bez nutnosti složitých strategií. Při větší hodnotě překryvu by však mohlo docházet ke značným kolizím trysky s již vytištěným materiálem. Vhodnější by tak mohl být menší překryv, u toho by však nemuselo dojít k dostatečně pevnému spoji. Z tohoto důvodu bylo navrženo několik dalších strategií, jak dostatečně kvalitního spoje dosáhnout. Požadavkem bude dostatečně pevné spojení bez výrazného ovlivnění geometrie tisku.



obr. 4-12: Základní strategie napojení vodorovných prutů

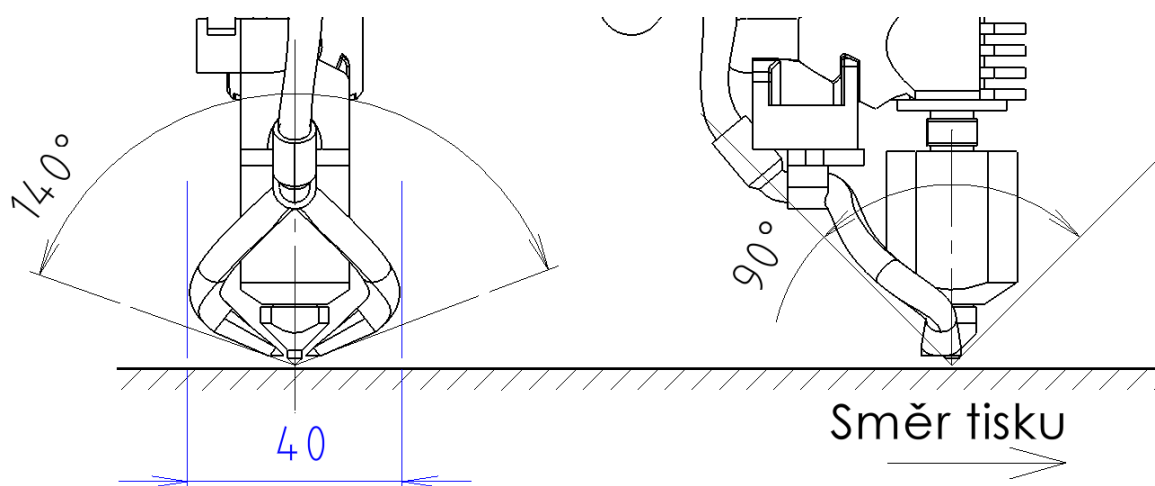
Na obr. 4-13 lze vidět čtyři navržené strategie. U všech čtyř strategií je předpokládán velmi mírný překryv drah pro zvýšení pevnosti. První navržená strategie (A) využívá reorientace tiskové hlavy. Této strategii lze tedy využít pouze při tisku s naklopenou tiskovou hlavou. Podstatou strategie je zatlačení ještě nataveného materiálu do již vytištěného pomocí trysky extrudéru. Ve velmi krátkém čase tak dojde k napolohování trysky do svislého směru, zalisování materiálu a naklopení trysky zpět do původní polohy. Celý cyklus proběhne nad horní základnou lichoběžníku. Další tři strategie fungují obdobným způsobem a to na principu zatlačení materiálu do již vytištěné části. Tyto strategie byly inspirovány prací [24] a jsou vhodné pro libovolnou orientaci tiskové hlavy. Důležitým parametrem, který bude nutné zjistit je hloubka vniknutí. Při příliš mělkém vniknutí nemusí dojít k dostatečně pevnému spoji, při příliš hlubokém k ucpání trysky. První ze tří strategií (B) upraví trajektorii tiskové hlavy tak, že nad začátkem horní základny lichoběžníku začne po rampě klesat do středu základny. Ze středu opět vyjíždí po rampě nad konec horní základny, odtud poté pokračuje vodorovně k dalšímu lichoběžníku. Další strategie (C) má stejný začátek jako předchozí, výjezd ze středu je však proveden kolmo nahoru. Následuje opět vodorovný tisk. Výhodou oproti předchozí strategii by měl být menší propad nad středem horní základny lichoběžníku. Poslední strategie (D) je obdobou předchozí, na rozdíl od ní však probíhá vodorovný tisk až do středu horní základny. Odtud poté probíhá vniknutí do již vytištěného materiálu kolmo dolů. Následuje vyjetí po rampě a vodorovné pokračování k dalšímu lichoběžníku.



obr. 4-13: Strategie napojení vodorovných prutů

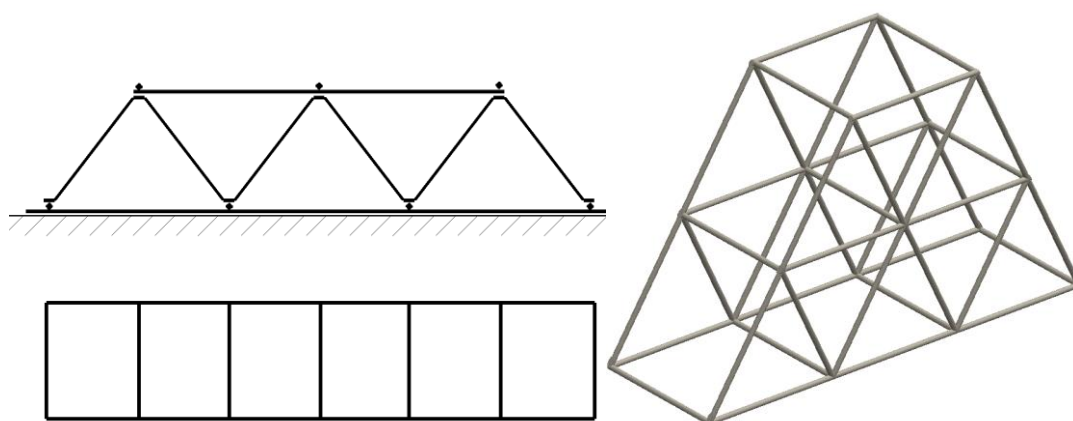
4.5.5 Tisk objemové struktury

Po získání všech potřebných parametrů a vhodných strategií pro lichoběžníkové a vodorovné pruty, budou tyto znalosti zkombinovány pro tisk objemových struktur. Objemové struktury budou navrženy tak aby využívaly lichoběžníkového tvaru. Nutností bude také navrhnout strukturu tak, aby nemohlo dojít ke kolizím tiskové hlavy s již vytištěnými částmi. Geometrie tiskové hlavy (obr. 4-14) tak je výrazným omezením, především poté ve směru kolmém na směr tisku, kdy je vrcholový úhel tiskové hlavy 140° .



obr. 4-14: Omezení geometrie tiskové hlavy

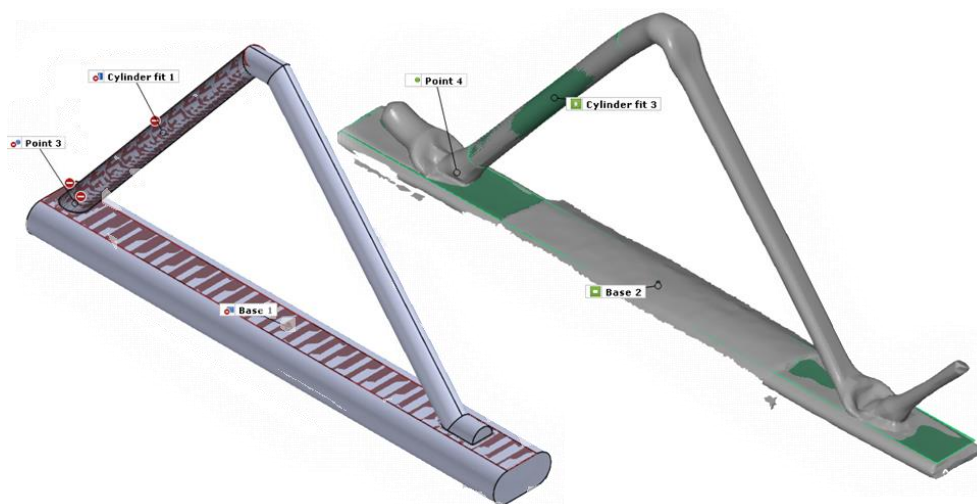
Navržená struktura (obr. 4-15) má tedy jednoduchý opakující se tvar, kdy hlavní část tvoří série lichoběžníků podobně jako na obr. 4-8. Takovéto série jsou rovnoběžně vytištěny v potřebném počtu pro vyplnění požadovaného objemu. Důležité je dodržet vhodnou vzdálenost mezi jednotlivými sériemi tak aby nedošlo ke kolizi s vedlejší sérií. Minimální vzdáleností mezi jednotlivými vrstvami je pak 21 mm. Následně dojde k jejich propojení vodorovnými pruty, tak že mezi jednotlivými výškovými vrstvami lichoběžníků dojde k vytvoření obdélníků. Takto získané buňky lze libovolně vrstvit, pro vyplnění požadovaného objemu.



obr. 4-15: Navržená objemová struktura

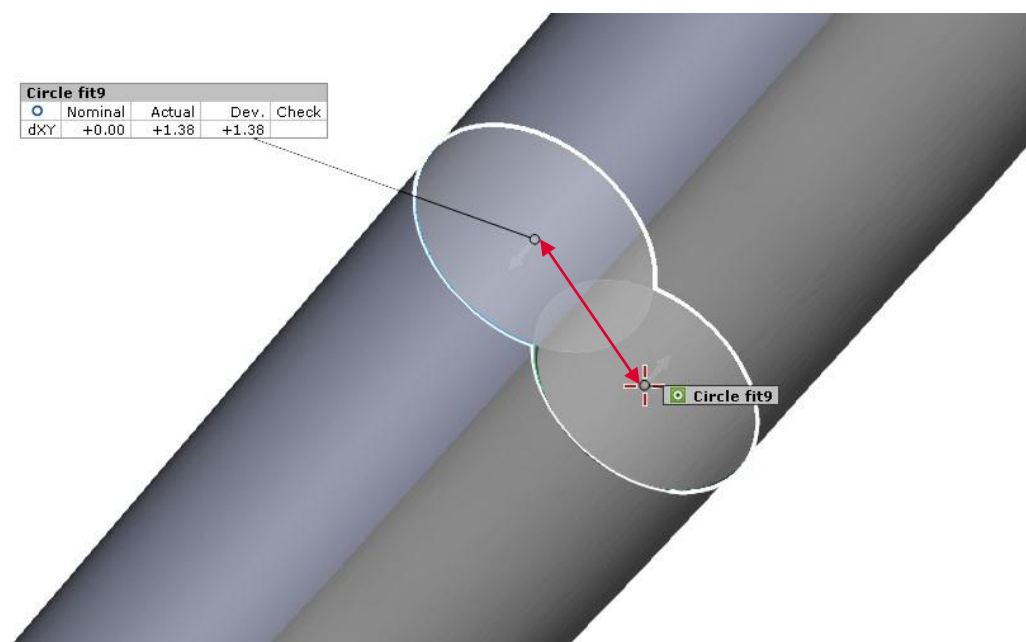
4.6 Vyhodnocení odchylek od ideálního tvaru

Po vytištění je nutné vzorky naskenovat pomocí 3D skeneru, tak aby byly získány co nejpresnější data o tvaru těchto vzorků. Kvůli velkému množství vzorků a jejich drobné geometrii je problematické na vzorky umístit referenční značky pro sjednocení jednotlivých pohledů. Z tohoto důvodu je při skenování použit speciální přípravek opatřen těmito referenčními značkami. Získané skeny v podobě 3D sítě jsou následně vyhodnoceny v prostředí GOM Inspect. Každý sken je zarovnán s odpovídajícím CAD modelem reprezentujícím ideální tvar prutů. Pro zarovnání je využita metoda Plane-Point-Line. Jak z názvu vyplívá, metoda využívá kombinaci zarovnání roviny, bodu a čary. Pro rovinu byla vybrána horní plocha podkladové linie, která je zarovnána tryskou extrudéru ve známé výšce vůči zbývajícím trajektoriím. Pro čáry je využita osa proloženého válce stoupajícího prutu. Pro body je následně využit průsečík této osy a vytvořené osy. Tento bod je totiž přesně definován trajektorií tiskové hlavy a materiál v něm nemá možnost uhnout. Prvky použité k zarovnání lze vidět na obr. 4-16, pro nominální model vlevo a pro sken vpravo.



obr. 4-16: Prvky použité k zarovnání, nominální model vlevo, sken vpravo

Následné vyhodnocení odchylek bude probíhat ve stanovených bodech (obr. 4-9). Prvním krokem je vytvoření rovin na CAD modelu, které budou procházet jednotlivými body a zároveň budou kolmé k ose prutu. Pomocí těchto rovin je vytvořen řez jak CAD modelem tak skenem, porovnáván průřezy tak leží v jedné rovině. Výjimku tvoří 4. porovnávající bod ve středu horní základny lichoběžníku. V tomto bodě je vytvářen průřez vždy v nejvyšším bodě výtisku, protože tento bod nemusí ležet přímo pod středem nominálního modelu. Dalším krokem je proložení průřezů jak nominálního modelu, tak skenu kružnicí. Následně je změřena vzdálenost středu kružnice (osy prutu) skenu od středu kružnice CAD modelu. Příklad vyhodnocení na obr. 4-17. Pro vyhodnocení bylo následně zavedeno pravidlo, že pokud je odchylka výtisku směrem dovnitř nominálního lichoběžníku, je odchylka kladná. Pokud směřuje odchylka ven z nominálního lichoběžníku, je odchylka záporná.



obr. 4-17: Příklad vyhodnocení odchylky od ideálního tvaru

5 VÝSLEDKY

5.1 Pruty lichoběžníkového tvaru

5.1.1 Statistické plánování experimentu

Pro zjištění vhodných parametrů pro tisk lichoběžníků bylo využito metody statistického plánování experimentu. Vstupní hodnoty parametrů byly zjištěny z prvotních experimentů, kdy bylo podmínkou, aby při jakékoli kombinaci parametrů byla zajištěna tisknutelnost prutů. Pro takto zjištěné okrajové podmínky (tab. 4-3) byl vytvořen faktorový plán experimentu. Do nastavení experimentu bylo vloženo pět parametrů, a to konkrétně rychlost posuvu, průtok vzduchu pro ofuk nánosu, úhel prutu od podložky, délka prutu a natočení tiskové hlavy. Pro analýzu byl vybrán neúplný faktorový plán s rozlišením V. Při takovémto rozlišení nedojde ke zkreslení hlavních faktorů a jejich dvojkombinací, což je pro danou aplikaci zcela dostatečné. Analýza bude obsahovat také středový bod a celá bude provedena s trojitým opakováním pro zvýšení její přesnosti. Takto nastavená analýza poté vede na celkový počet 51 vzorků. Celá analýza pracuje s intervalem spolehlivosti 95 %. Konkrétní nastavení jednotlivých vzorků lze nalézt v příloze 1.

Pro takto nastavený experiment následně proběhl tisk vzorků. Při tisku s naklopenou tiskovou hlavou však nedocházelo k dostatečně pevnému propojení mezi tištěnými pruty a podkladovou linií. Z tohoto důvodu docházelo při manipulaci se vzorky k jejich rozlomení, a tak k nemožnosti jejich vyhodnocení. Proto byla při napojování tištěného prutu na spodní linku aplikována tisková strategie využívající reorientaci tiskové hlavy popsána v kapitole 4.5.4. S takto aplikovanou strategií dosahovaly vzorky dostatečné pevnosti pro bezpečné vyhodnocení. Po vytištění vzorku došlo k jejich naskenování pomocí optického 3D skeneru. Ze skenů bylo následně získáno osm odezev pro každý vzorek, sedm odchylek střednice prutu a jedna úhlová odchylka. Získané odchylky pro všechny vzorky lze nalézt v příloze 1. Takto získaná data byla následně vložena do statistického softwaru Minitab a celý experiment byl vyhodnocen.

Ukázalo se však, že faktorový plán není dostatečný. Přesnost získaných modelů byla nedostačující, a také optimalizační nástroj fungoval pouze pro naměřené body, tedy body okrajové a středový bod. Faktorový plán také pracuje pouze s lineární závislostí sledovaných parametrů. Proto bylo přistoupeno k rozšíření analýzy na design odezvvé plochy (Response surface design). Byly tak přidány osově body pro zvýšení přesnosti modelu a zjištění nejen lineární, ale i kvadratické závislosti jednotlivých parametrů. Kvůli zajištění tisknutelnosti přidávaných vzorků byly zvoleny plošně středěné body, tedy že takto vygenerované vzorky budou mít parametry vždy v zadaném rozsahu. Pro tyto body bude vytvořeno pouze jedno

opakování, vznikne tak dalších jedenáct vzorků. Takto vytištěné, naskenované a vyhodnocené vzorky jsou dostatečné pro vytvoření statistického modelu.

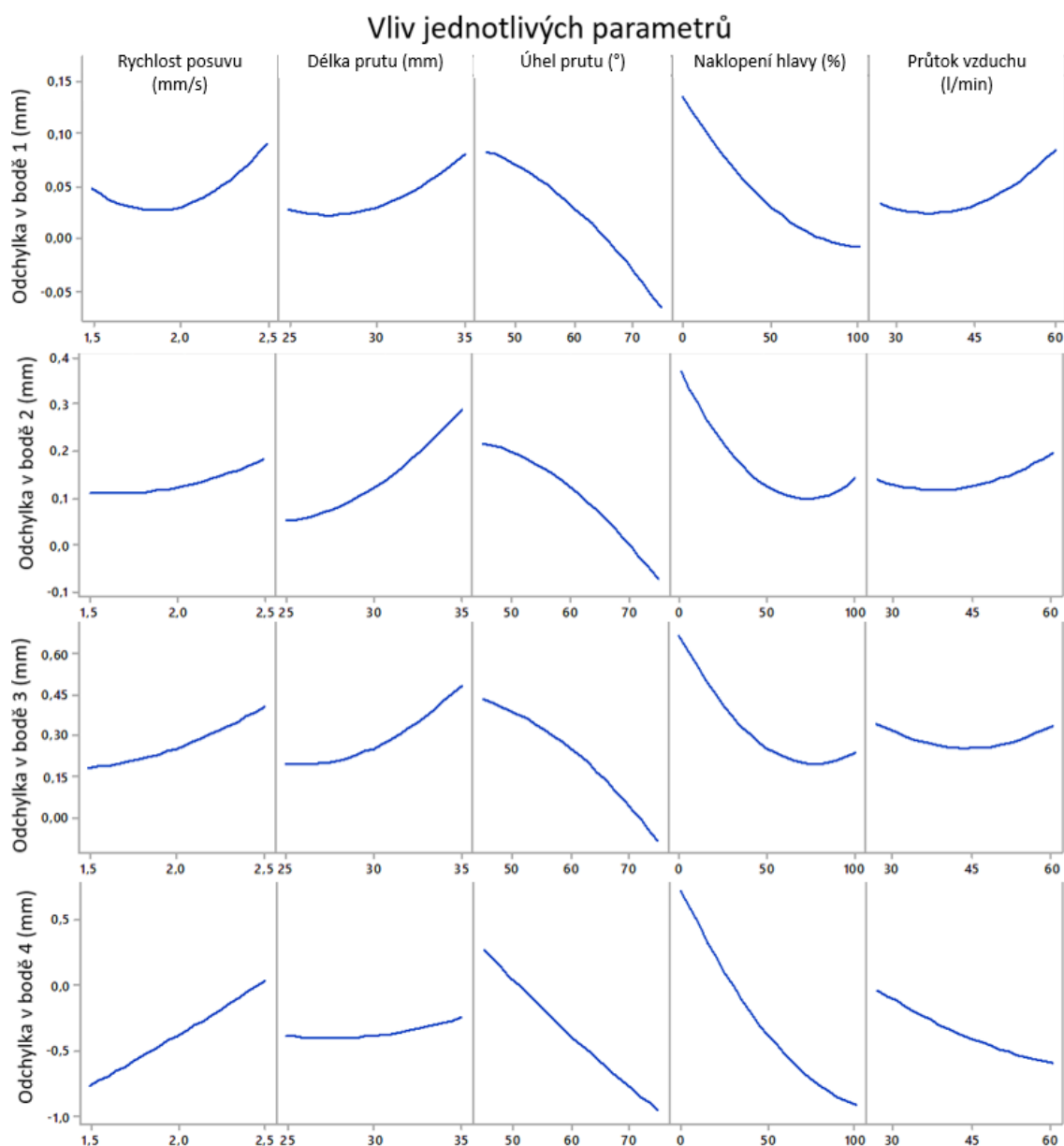
Ze statistického modelu lze vyčíst vliv jednotlivých parametrů ale také jejich dvojkombinací. V průběhu tisku lichoběžníku se vliv jednotlivých parametrů mění. Vliv jednotlivých parametrů lze pro vybrané odezvy vidět na obr. 5-1. Všechny grafy a podrobné informace ke statistickému modelu lze najít v příloze 2. Ze všech grafů tak lze vidět, že vlivy lze rozdělit na jednotlivé části tisku, na stoupající prut, vrchol a klesající prut. V těchto částech jsou si pak vlivy velmi podobné.

Z grafu lze také vyčíst významnost jednotlivých parametrů, čím je křivka strmější, tím má parametr větší vliv na výsledek. Zároveň lze vyčíst i jeho vhodnou hodnotu pro dosažení co nejpresnějšího tisku. Bude jí hodnota blížící se hodnotě nula na ose y. Je však nutné pamatovat na to, že vliv mají nejen jednotlivé parametry ale i jejich kombinace. Podrobnější informace o významnosti jednotlivých parametrů lze však vyčíst z dat analýzy. Také zde lze rozlišit lineární a kvadratický vliv jednotlivých parametrů. Jelikož se jedná o statistickou metodu, analýza vždy obsahuje určitou chybu, tu z dat lze také vyčíst. Pro zvýšení přehlednosti jsou výsledky rozděleny na dvě části. V první části budou předloženy výsledky pro první čtyři odezvy, tedy tři body stoupajícího prutu a středový bod horní základny lichoběžníku. V druhé části budou výsledky pro další čtyři odezvy tedy tři body klesajícího prutu a úhlovou odchylku.

5.1.2 Výsledky statistického plánování experimentu pro první čtyři odezvy

Na obr. 5-1 můžeme pro první tři body, tedy stoupající pruty, sledovat, že křivky grafů mají téměř totožný tvar, avšak mění se jejich měřítko na ose y. To je způsobeno především tím, že stoupající pruty jsou většinou velmi rovné, avšak dochází k jejich poklesu, proto odchylka prutu od ideálního tvaru roste se vzdáleností vyhodnocovaného bodu od podložky. V horním vyhodnocovaném bodě lichoběžníku (bod 4) lze vidět podobnost s předchozími třemi body, avšak už zde dochází k drobným změnám.

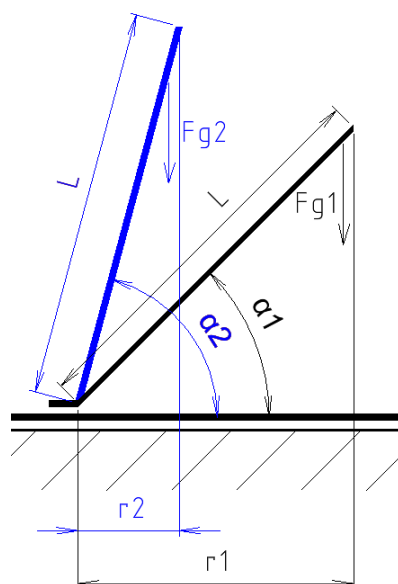
Při změření se na jednotlivé parametry můžeme sledovat, že například pro rychlost posuvu odchylka mírně roste se stoupající rychlostí. To je způsobeno především dobou potřebnou pro zchladnutí materiálu. Při příliš velké rychlosti dojde dříve ke změně směru tisku, prut není ještě dostatečně zchladlý a dochází tak k jeho deformaci. Současně je prut menší dobu v proudu ofukového vzduchu, a tak je jeho zchlazení ještě zhoršeno. Také lze vidět, že pro vyšší rychlosti má křivka tendenci kvadraticky růst. Při rychlostech nad zvolený rozsah by bylo tedy velmi obtížné tištěný prut uchladit.



obr. 5-1: Vliv parametrů pro stoupající pruty a horní základnu lichoběžníku

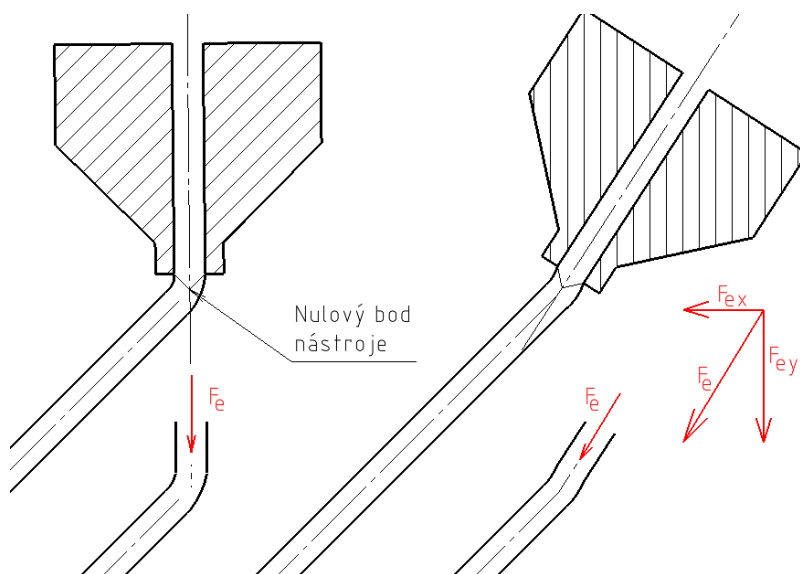
Pro délku prutu je charakter křivky podobný jako rychlost posuvu, je však mírně strmější a má tedy větší vliv na výsledek. S rostoucí délkou prutu tedy roste i odchylka, to je způsobeno především právě úhlovou odchylkou od ideálního tvaru. Kdy při delším prutu je i při stejném úhlovém odchýlení větší odchylka než u prutu kratšího. Zároveň je delší prut i těžší díky čemuž na něj působí větší gravitační síla a pravděpodobně tak dochází k větší deformaci. Pro bod 4 má poté délka prutu téměř zanedbatelný vliv.

Z grafu lze díky strmosti křivky vyčíst, že úhel prutu má významný vliv. Je zjevné, že se stoupající velikostí úhlu klesá odchylka. Toto je pravděpodobně způsobeno mimo jiné opět působením gravitační síly, kdy při větším úhlu klesá rameno gravitační síly způsobující ohybový moment v patě prutu (obr. 5-2). Dalším významným vlivem je také natočení trysky extrudéru vůči ose prutu.



obr. 5-2: Vliv úhlu prutu na velikost ramene ohybového momentu v patě prutu

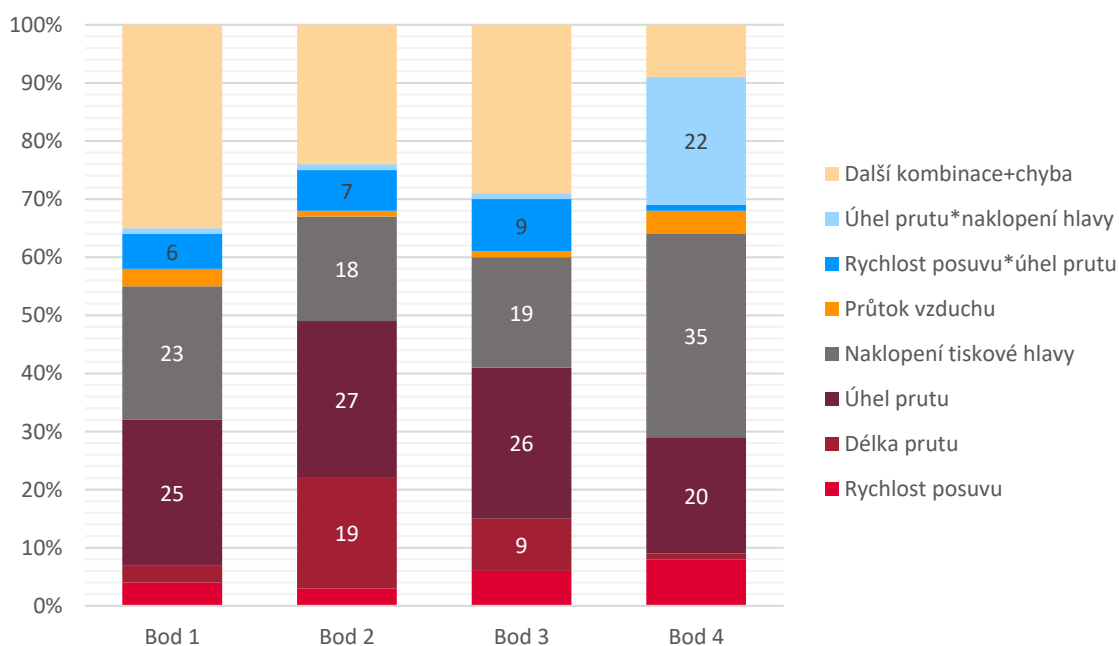
Dalším velmi významný, vlivem s výrazně strmou křivkou je pak právě naklopení tiskové hlavy. Lze vidět, že při sklopení hlavy výrazně klesá odchylka prutu od ideálního stavu. Lze však také pozorovat, že při maximálním naklopení odchylka mírně roste. Při naklopení hlavy se mění směr, kterým je extrudován materiál, a tak dochází i ke změně silového působení. Především se tedy jedná o sílu extruze F_e . Tato síla vzniká vytlačováním materiálu z trysky. Při tiskové hlavě ve svislé poloze síla směřuje směrem dolů, sčítá se silou gravitační a mírně posouvá tištěný materiál (obr. 5-3). Při naklopení tiskové hlavy se tak ke gravitační síle přičítá pouze její svislá složka. Naopak její vodorovná složka vrací prut mírně na požadované místo. Dalším pravděpodobným vlivem je změna polohy ofukové trysky vůči nánosu, díky čemuž může docházet ke kvalitnějšímu chlazení, a tak k lepšímu zajištění požadovaného tvaru.



obr. 5-3: Vliv natočení tiskové hlavy na směr síly extruze

Posledním zkoumaným parametrem je poté množství ofukového vzduchu používaného pro chlazení tisku. Z grafu lze vyčíst, že pro stoupající pruty nemá množství ofukového vzduchu příliš velký význam ve zkoumaném intervalu. Je však nutné zmínit, že samotný ofukový vzduch má významný vliv a bez jeho užití je struktura nevystavitelná. Ve zkoumaném intervalu však význam tohoto parametru není tak vysoký. Zároveň lze říct, že pro stoupající pruty leží nejvhodnější množství vzduchu v první polovině zkoumaného intervalu.

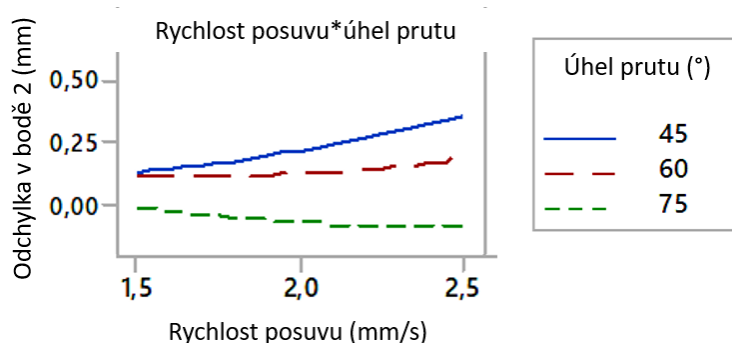
Na obr. 5-4 je možné vidět graf znázorňující procentuální vliv jednotlivých parametrů na první čtyři odezvy. U bodů dva a tři lze vidět vliv délky prutu. U všech čtyř bodů je možné pozorovat významný vliv úhlu prutu, jak bylo zmíněno výše. Další významným vlivem je pak naklopení tiskové hlavy. V bodě 4 se jedná o velmi významný parametr, kdy má více než třetinový vliv na výsledek. Parametry jako průtok vzduchu nebo rychlost posuvu, mají pouze velmi malý vliv. Jak již bylo zmíněno, u obou parametrů je to dáno především velmi úzkým intervalem zkoumaných hodnot. Jak je ale patrné z obr. 5-1, zkoumaný interval se pohybuje ve vrcholu paraboly, parametry jsou tedy zkoumané ve vhodném intervalu. Dále jsou zmíněny dvě kombinace parametrů. První z nich je kombinace rychlosti posuvu a úhlu prutu. Tato kombinace má vliv především u bodů ležících na stoupajícím prutu, tedy prvních třech bodů. U čtvrtého bodu má poté téměř zanedbatelný vliv. Další zvýrazněnou kombinací je kombinace úhlu prutu a naklopení tiskové hlavy. Ta je naopak u prvních třech bodů téměř zanedbatelná, ale je velmi významná u čtvrtého bodu, kde tvoří více než pětinu modelu. Horní část sloupců grafů poté tvoří součet dalších kombinací parametrů a statistické chyby.



obr. 5-4: Vliv jednotlivých parametrů a jejich kombinací pro první čtyři odezvy

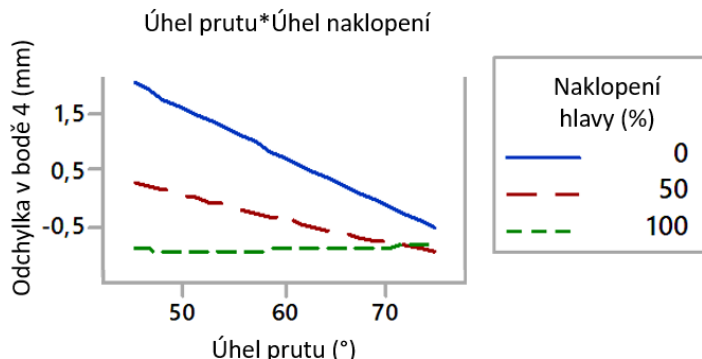
Grafy pro vliv všech kombinací faktorů jsou zobrazeny v příloze 2. Na obr. 5-5 je zobrazen vliv kombinace rychlosti posuvu a úhlu prutu v bodě 2. Z grafu lze vyčíst, že při rychlosti posuvu 1,5 mm/s je vliv úhlu prutu velmi malý. Při různých hodnotách úhlu α je dosaženo

téměř stejné odchylky. Naopak při použití větší rychlosti posuvu, například 2,5 mm/s lze pozorovat změnu zvýšení vlivu úhlu prutu. Při různých hodnotách úhlu α se odchylky od sebe už výrazněji liší.



obr. 5-5: Vliv kombinace rychlosti posuvu a úhlu prutu v bodě 2

Další zmíněnou kombinací je kombinace úhlu prutu a úhlu naklopení. Významná je především v bodě 4, závislost lze vidět na obr. 5-6. Při narůstajícím úhlu prutu klesá vliv naklopení tiskové hlavy. Jedním z důvodů proč tomu tak je, je fakt, že naklopení tiskové hlavy je definováno pomocí procentuálního rozsahu. Je tedy nutné si uvědomit, že při úhlu prutu α 45° je rozsah naklopení roven také 45°. Naopak při úhlu prutu α 75° je rozsah naklopení pouze 15°. Změna naklopení tiskové hlavy tak v tomto rozsahu už nebude mít takový vliv jako u prutů s menším úhlem a tedy větším rozsahem.

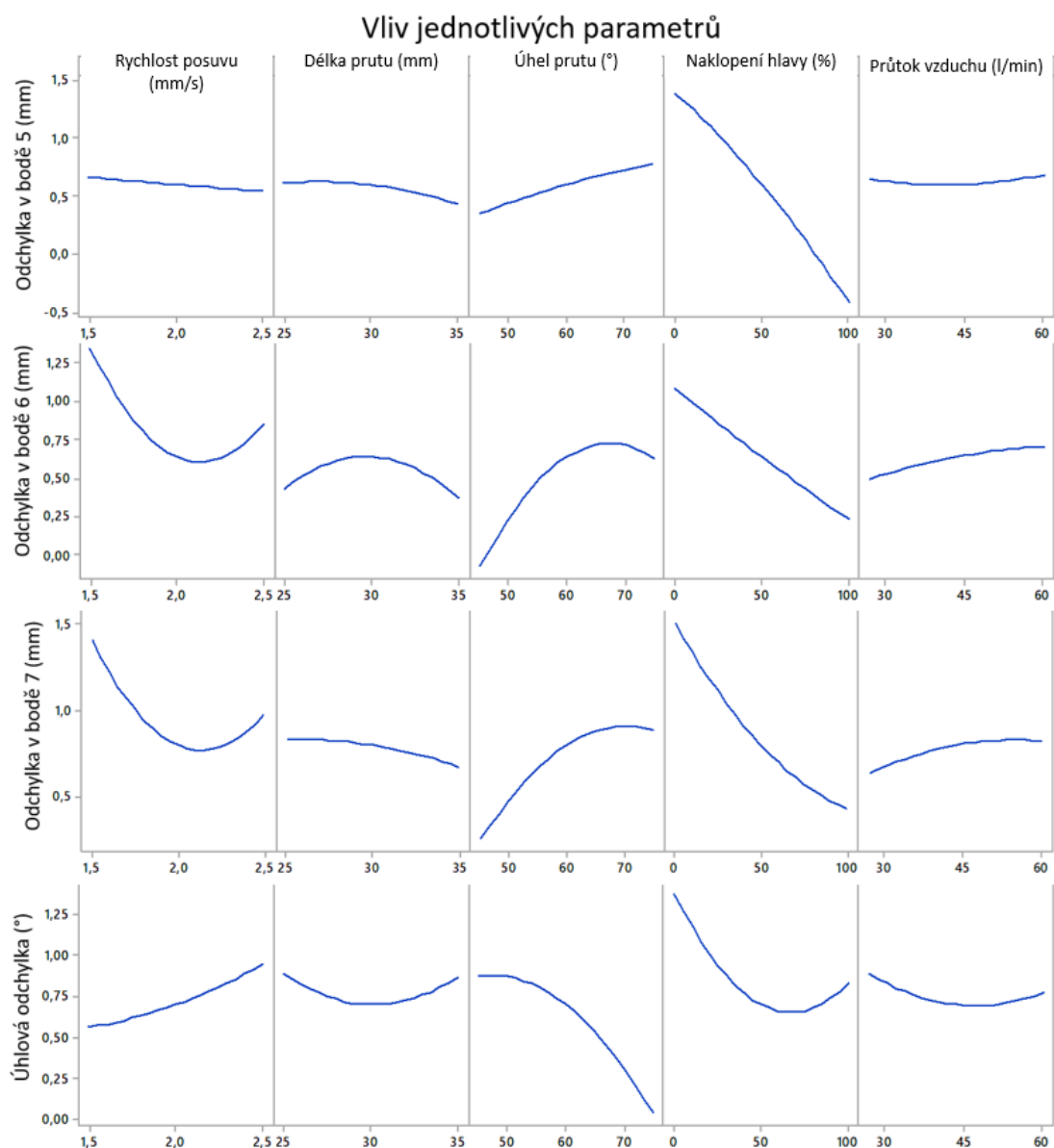


obr. 5-6: Vliv kombinace úhlu prutu a úhlu naklopení v bodě 4

5.1.3 Výsledky statistického plánování experimentu pro druhé čtyři odezvy

Podobně jako u stoupajících prutů, můžeme i u klesajících prutů vidět podobnost vlivů pro dané body (obr. 5-7). Především body šest a sedm mají téměř totožný průběh. Výjimku však tvoří bod pět, u něhož jsou křivky vlivu odlišné. Tato odlišnost může být způsobena tím, že bod pět leží na prutu těsně po změně směru tisku. Toto může ovlivnit vliv jednotlivých parametrů. Naopak u bodů šest a sedm je tisk už ustálený a tak jsou vlivy jednotlivých

parametrů velmi podobné. Rozdíl oproti stoupajícím prutům také spočívá v tom, že při tisku stoupajících prutů je prut vytahován do prostoru a je snaha o jeho zchlazení v co nejkratším čase, tedy než dojde k jeho deformaci. Naopak u klesajících prutů je prut tištěn z již vytištěného nánosu, který už by měl být dostatečně zchlazený, do bodu na podložce. Nejde tedy o tisk prutu z pevného bodu do prostoru, ale o tisk prutu mezi dvěma relativně pevnými body. Dalším důležitým faktem je, že na přesnost tisku klesajících prutů má přímý vliv přesnost tisku prutů stoupajících. Tedy pokud je první část lichoběžníku vytištěna nepřesně, lze velmi těžko očekávat, že druhá část bude vytištěna přesně.



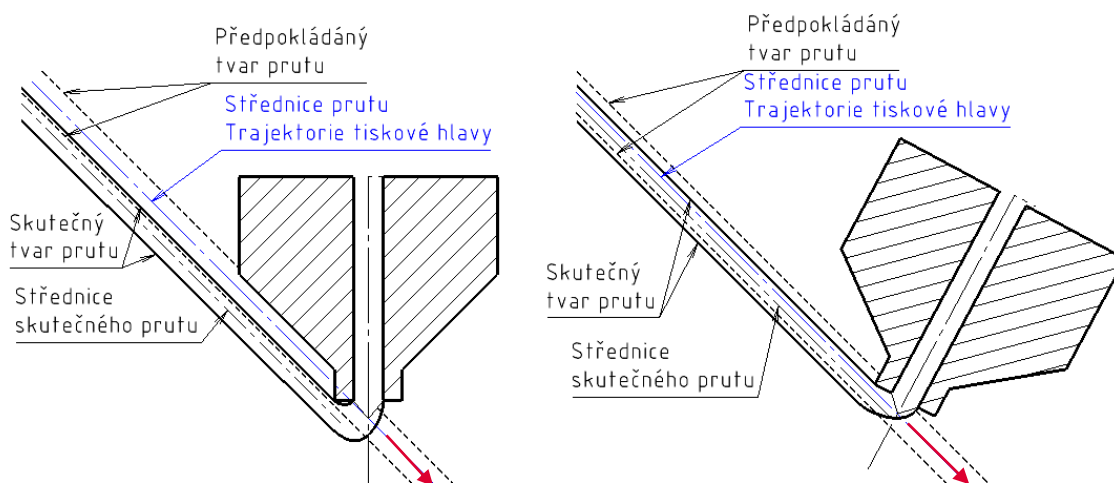
obr. 5-7: Vliv parametrů pro klesající pruty a úhlovou odchylku

Při zaměření se na jednotlivé parametry můžeme sledovat, že pro rychlost posuvu není jako u stoupajících prutu nejvhodnější nižší rychlost, ale mírně vyšší. To je způsobeno pravděpodobně právě tím, že se jedná právě o tisk mezi dvěma body. Při vyšší rychlosti tak dochází k rychlejšímu spojení těchto bodů a napnutí ještě nezchlazeného prutu. Příliš velká

rychlost však způsobuje nedostatečné chlazení a tak možné prověšení prutu ještě před spojením bodů. Pro úhlovou odchylku je pak naopak vhodnější rychlost nižší

Z ne příliš strmé křivky lze vyčíst, že délka prutu nemá výrazný vliv na tisk klesajících prutů. Naopak vliv úhlu prutu je nezanedbatelný. Průběh vlivu má pak opačnou tendenci než u stoupajících prutů. Možným důvodem tohoto jevu je právě přesnost stoupajících prutů. Dalším pravděpodobným důvodem je poloha trysky extrudéru vůči nánosu, kdy při menších úhlech nedochází k tak výrazné kolizi jako u větších úhlů (obr. 5-8). Pro úhlovou odchylku je poté vliv i jeho důvody podobné jako pro stoupající pruty.

Dalším velmi významným parametrem je naklopení tiskové hlavy. Podobně jako u stoupajících prutů dochází při větším naklopení k nižším odchylkám. V případě klesajících prutů je to však způsobeno především kolizí tištěného prutu s tiskovou hlavou. Ke kolizi dochází díky tomu, že materiál je extrudován pod trysku, která se pohybuje směrem dolů, dochází tak k odtlačování materiálu hranou trysky. Při naklopení tiskové hlavy není tento efekt tak výrazný, jak lze vidět na obr. 5-8.

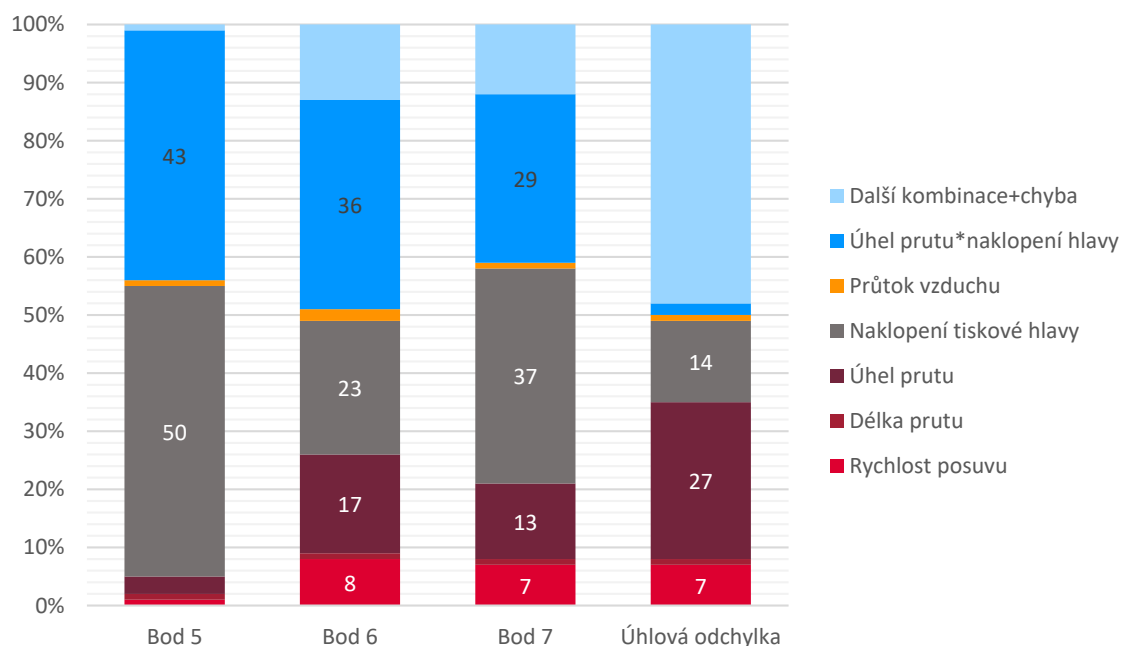


obr. 5-8: Vliv kolize tiskové hlavy na přesnost klesajících prutů

Průtok vzduchu u klesajících prutů, podobně jako u těch stoupajících nemá příliš velký vliv, je to opět dáno především vhodně nastaveným rozsahem zkoumaného faktoru. Lze však pozorovat, že především v bodě šest a sedm má křivka tendenci klesat při nižších hodnotách. Je tedy možné, že by bylo možné dosáhnout lepších výsledků při nižším průtoku vzduchu.

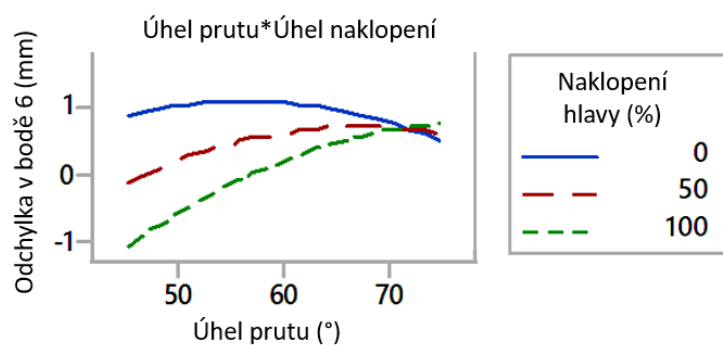
Procentuální vliv jednotlivých parametrů a hlavních kombinací lze vidět na obr. 5-9. Na první pohled je patrné, že největší procentuální vliv má úhel prutu, naklopení tiskové hlavy a jejich kombinace. Pro všechny body na klesajícím prutu tvoří tyto faktory více než dvě třetiny vlivu. Pro bod pět tvoří dokonce více než devadesát procent. Pro body šest a sedm má poté nezanedbatelný vliv i rychlost posuvu. Pro úhlovou odchylku má největší procentuální vliv úhel prutu, dále to je pak naklopení tiskové hlavy a rychlost posuvu. Kombinace úhlu prutu a naklopení tiskové hlavy má minimální význam. Velkou část sloupce

pro úhlovou odchylku tvoří horní část, to je dáno tím, že je zde mnoho drobných vlivů různých kombinací parametrů. Podrobnější data k rozložení vlivu lze najít v příloze 2.



obr. 5-9: Vliv jednotlivých parametrů a jejich kombinací pro druhé čtyři odezvy

Nejvýraznější kombinací u klesajících prutů je kombinace úhlu prutu a naklopení tiskové hlavy. Na obr. 5-10 lze vidět graf vlivu této kombinace pro bod šest. V bodě pět a sedm má graf velmi podobný charakter. Podobně pak jako u bodu čtyři, i zde je výrazný vliv naklopení hlavy především pro pruty s nižším úhlem. Pro pruty s vyšším úhlem je poté vliv naklopení hlavy nepodstatný. Toto je opět způsobeno především změnou rozsahu naklopení. Dalším důvodem významnosti této kombinace je právě vliv kolize tiskové hlavy s tištěným prutem, jak bylo zmíněno výše.



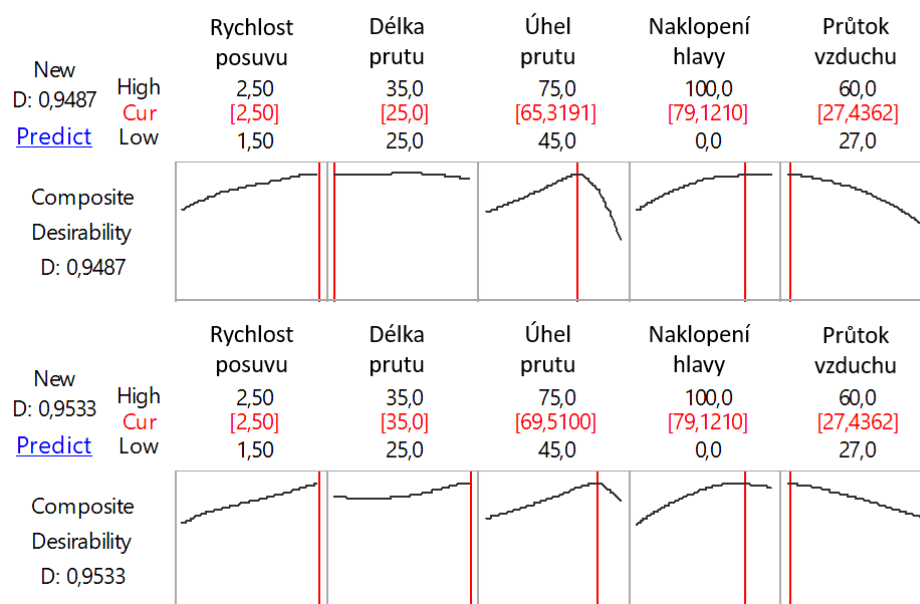
obr. 5-10: Vliv kombinace úhlu prutu a úhlu naklopení v bodě 6

5.1.4 Ověření statistického modelu a optimalizační nástroj

Aby bylo možné výše popsaný statistický model prohlásit za dostatečně přesný a odpovídající realitě, je nutné provést jeho ověření. Jednou z možností jak ověření dosáhnout, je vytvořit sadu vzorků s náhodně vygenerovanými procesními parametry. Pro tyto parametry následně pomocí modelu vytvořit predikci geometrické odchylky a porovnat predikované odchylky s reálnými. Pokud naměřené odchylky budou ležet v predikovaných intervalech lze statistický model prohlásit za dostatečný. Vzhledem k tomu, že cílem práce je nalézt nejvhodnější procesní parametry, byl zvolen mírně jiný přístup. Program Minitab a v něm vložený statistický model umožňuje nejen predikci, ale i nalezení vhodných parametrů na základě požadavků pomocí optimalizačního nástroje. Procesní parametry pro ověřovací vzorky tedy nebudou generovány náhodně ale pomocí optimalizačního nástroje.

Optimalizačním nástrojem je myšlena funkce programu Minitab s názvem Response Optimizer. Tento nástroj umožňuje nalezení vhodných parametrů pro požadované výstupy. Pro každou z odezev je možné nastavit požadovaný výstup formou minimální, maximální nebo přesné požadované hodnoty. Také je možné části modelu pro konkrétní odezvy do optimalizace vůbec nezapojoovat. V našem případě bude využito optimalizace na konkrétní hodnotu, a tou bude hodnota nula, tedy bez odchylky. Další výhodou je možnost přednastavení určitých parametrů, ať už rozsahem nebo přesnou hodnotou. Ostatní parametry jsou následně optimalizovány vůči těmto parametrům. Tohoto lze v našem případě s výhodou využít, například pokud chceme určitou geometrii prutové struktury nebo pokud chceme kvůli zvýšení produktivity zadat minimální rychlost výroby.

Nástroj také umožňuje přehledně znázornit vliv jednotlivých parametrů na dosažení požadovaného výstupu. Tento vliv je získán ze všech submodelů pro odezvy vstupující do optimalizace, a zároveň z nastavených parametrů. Při změně některého z parametrů, tak může dojít ke změně vhodného nastavení. Na obr. 5-11 můžeme vidět dvě optimalizace. Pro každé pole grafu je osa x tvořena konkrétním parametrem ve zkoumaném rozsahu. Na ose y je poté vhodnost složení všech vstupů, pohybující se od nuly do jedné. Tato hodnota ukazuje, jak moc se predikce z nastavených parametrů blíží požadované hodnotě, kdy při hodnotě jedna je požadovaná hodnota dosažena. V prvním řádku lze vidět nastavenou délku prutu 25 mm. Pro takto dlouhý prut je nejvhodnějším úhlem, úhel kolem 65°. Na druhém řádku byla změněna délka prutu na 35 mm. Je možné pozorovat především změnu křivky právě pro úhel prutu, kdy nejvhodnějším úhlem je úhel kolem 70°.



obr. 5-11: Grafický výstup optimalizačního nástroje

Pro potřeby ověřovací sady vzorků bylo vytvořeno osm optimalizací. Pro jednotlivé optimalizace byly využity různé odezvy (body). Jednalo se o hledání vhodných parametrů na celém lichoběžníku (body 1-7), na stoupajících prutech (body 1-3), ve vrcholu (bod 4), a na klesajících prutech (body 5-7). Dále také byly optimalizace omezeny různými požadavky na konkrétní parametry. Vytvořené vzorky byly očíslovány od čísla 70 dál. Získané parametry lze vidět v tab. 5-1. Tučně zvýrazněné parametry jsou parametry zadány jako pevné. Vypočtené parametry byly zaokrouhleny na celá čísla, u rychlosti posuvu na desetiny.

tab. 5-1: Parametry pro ověřovací sérii

Číslo vzorku	Použité odezvy	Rychlost posuvu (mm/s)	Délka prutu (mm)	Úhel prutu (°)	Naklopení hlavy (%)	Průtok vzduchu (l/min)
70	1-7	2,3	30	60	81	27
71	1-7	2,2	30	60	78	35
72	1-3	1,5	30	45	70	48
73	1-3	2,5	30	73	75	57
74	4	2,0	30	60	50	27
75	4	2,5	30	60	100	27
76	5-7	2,2	30	60	82	60
77	5-7	1,8	28	50	70	27

Pro každou optimalizaci byla vytvořena predikce s 95% intervalem spolehlivosti. Po vytištění a vyhodnocení vzorků, byly reálné odchylky porovnány s touto predikcí. Hodnoty predikcí a všech geometrických odchylek vzorků lze nalézt v příloze 1 kapitola 1.5. Je zde také uvedena hodnota rozdílu geometrických odchylek a predikce. Po vyhodnocení bylo zjištěno, že na každém vzorku predikce nevyhovuje v jednom z bodů. Nikdy však nešlo o bod na stoupajícím prutu (body 1-3), ale o bod ve vrcholu lichoběžníku nebo na klesajícím prutu (body 4-7). Bohužel se nepodařilo zjistit žádné pravidlo, proč predikce nevyšla právě v daných bodech. Úhlová odchylka odpovídala predikovaným intervalům u všech vzorků.

Při důkladnějším pohledu na porovnání geometrických odchylek výtisku a predikce můžeme říct, že průměrný rozdíl (se směrodatnou odchylkou) predikce pro odchylky v sedmi bodech lichoběžníku je $0,21 \pm 0,20$ mm. Pokud se však zaměříme pouze na první tři body, tedy body stoupajícího prutu, uvidíme, že průměrný rozdíl od predikce je $0,12 \pm 0,09$ mm. Pro bod 4 ležící v horní části lichoběžníku je následně průměrný rozdíl od predikce $0,16 \pm 0,16$ mm. Pro klesající pruty jsou výsledky mírně horší, kdy průměrný rozdíl od predikce je $0,31 \pm 0,25$ mm. Pro úhlovou odchylku byl vyčíslen průměrný rozdíl od predikce $0,22^\circ \pm 0,13^\circ$. Z takto získaných dat lze prohlásit statistický model za dostatečně přesný a reprezentující realitu. Především pro první čtyři body a úhlovou odchylku je model velmi přesný. Lze tedy model využít pro predikci geometrických odchylek libovolného nastavení a zároveň nalezení vhodných parametrů dle požadavků.

Zaměříme-li se na velikosti geometrických odchylek, je možné prohlásit, že u šesti z osmi vzorků, nepřesáhla žádná z odchylek jeden milimetr. Toto je hodnota stanovená cílem práce jako maximální hodnota. Některé odchylky se této hranici však blížily, bylo tedy nutné využít některé z úprav tiskových strategií, pro zvýšení přesnosti výtisků. Další problematikou je pevnost spojů tištěných vzorků. Díky tomu, že chlazení nánosu probíhá po celou dobu tisku, je spoj chlazen a nedochází tak k dostatečnému prohřátí už vytištěného materiálu. Ve spoji tak nedojde k protavení jednotlivých nánosů, což má za následek snížení mechanických vlastností.

Na základě osmi kombinací parametrů byly vybrány dvě, s kterými budou prováděny další experimenty. Kombinace 1 kopíruje parametry vzorku 71. Tato kombinace byla vybrána především pro svou geometrii. Druhá kombinace vychází ze vzorku 77. Byla však mírně zvýšena rychlost posuvu pro zvýšení produktivity, a zvětšena délka prutu na 30 mm. To mělo za následek také zvýšení průtoku vzduchu. Tato kombinace byla vybrána kvůli jejím dobrým výsledkům, především u klesajících prutů. Přesné parametry obou kombinací jsou uvedeny v tab. 5-2.

tab. 5-2: Zvolené kombinace vhodných parametrů

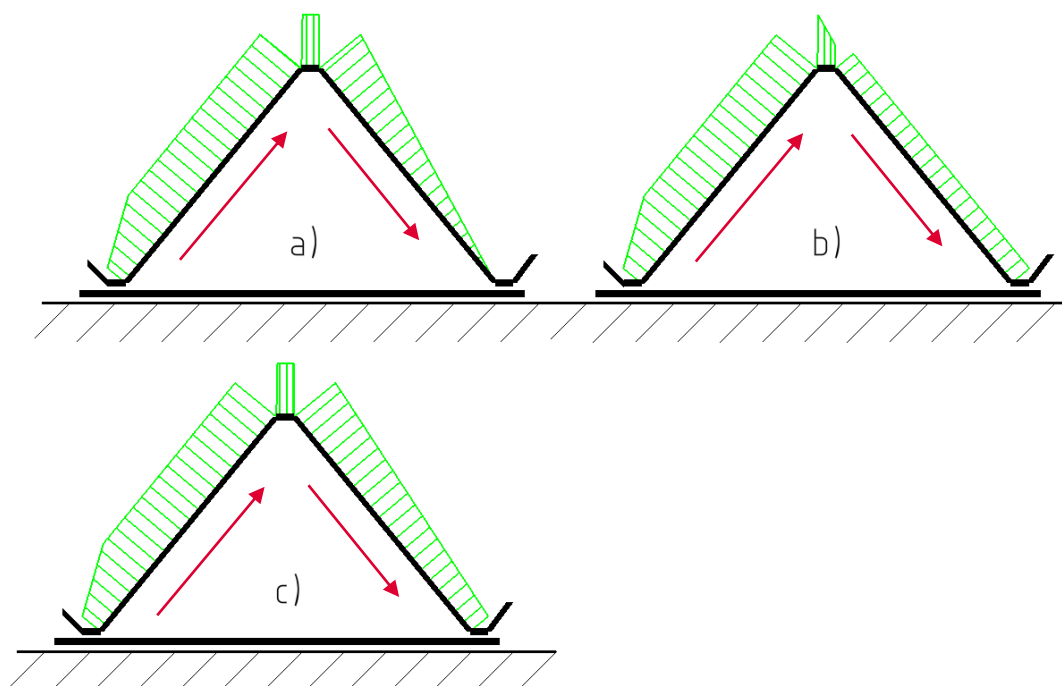
	Rychlost posuvu (mm/s)	Délka prutu (mm)	Úhel prutu (°)	Naklopení hlavy (%)	Průtok vzduchu (l/min)
Kombinace 1	2,2	30	60	78	35
Kombinace 2	2,0	30	50	70	33

5.1.5 Zvýšení pevnosti spojů

Jak bylo zmíněno, pevnost ve spoji mezi nánosem lichoběžníku a spodní linií, nebyla dostatečná. V nemalém množství docházelo u vzorků pouze ke spoji vláken v kontaktním režimu. Při mechanickém zatížení takového spoje došlo k jeho téměř okamžitému porušení. Toto je způsobeno především konstantním chlazením, kdy ve spoji je ochlazován, jak tištěný, tak už vytištěný materiál. Nedojde tak k natavení již vytištěného materiálu a provázání vláken s tištěným. Tištěný materiál tak pouze tvarově přilne k již vytištěnému. Jak vychází z rešerše, nejjednodušším způsobem je v místě spoje chlazení vypnout. Toto by neměl být problém z pohledu přesnosti, protože ve spoji je materiál kladen již na vytištěnou a stabilní část, takže by nemělo dojít k jeho deformaci. Prvním návrhem tedy byla strategie, kdy při tisku ramen a horní základny lichoběžníku bude probíhat konstantní chlazení. Při přejezdu mezi jednotlivými lichoběžníky, tedy ve spoji, bude poté chlazení vypnuto. Tato strategie se ukázala jako neproveditelná. Hlavním důvodem byla rychlost změny proudu vzduchu na začátku tisku stoupajícího prutu, tedy v bodě, kdy je proveden přechod z nulového proudu vzduchu na jmenovitý. Při v podstatě okamžitém otevření řídicího ventilu dojde na vyústění vzduchové trysky ke vzduchovému rázu, který narazí do nechlazené taveniny. To má za následek přerušení tištěného vlákna. Takovouto strategií, je tedy prutová struktura netisknutelná.

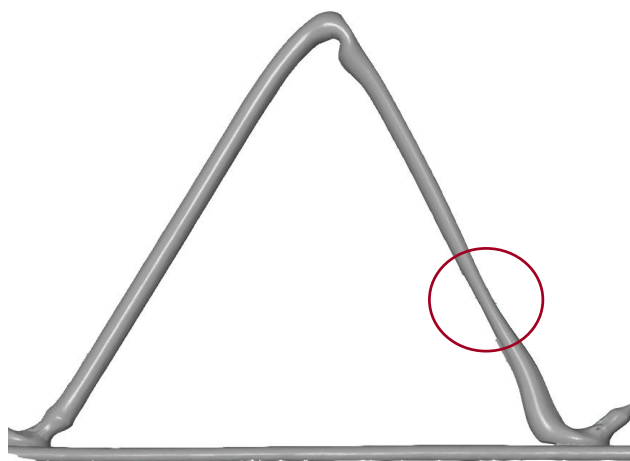
Na základě předchozích výsledků byly navrženy tři tiskové strategie řízení ofukového vzduchu. Všechny tři strategie jsou navrženy shodně pro stoupající prut. Pro tisk stoupajícího prutu je vhodné konstantní chlazení. Zůstává zde však problém s potřebou vypnutí chlazení v místě spoje, a nemožnost skokové změny proudu vzduchu. Řiditelný ventil a firmware tiskové hlavy však umožňuje plynulou změnu průtoku. Množství průtoku a rychlost jeho změny je následně řízena přímo z SRC-kódu řídicího programu robota. Konkrétní provedení lze vidět na obr. 5-12, kdy proud vzduchu začne na nižší hodnotě průtoku, tak aby nedošlo k přerušení vlákna, poté lineárně roste do požadované hodnoty. Nižší hodnota byla experimentálně stanovena na 20 l/min, požadovaná hodnota bude poté vycházet z nastavení parametrů, viz. tab. 5-2, tedy 35 l/min. Zároveň byla zkoumána rychlost dosažení požadované hodnoty průtoku, kdy bylo požadováno jejího co nejrychlejšího dosažení. Nakonec bylo zvoleno nastavení, kdy požadovaného průtoku vzduchu je dosaženo

ve dvaceti procentech délky prutu. Zároveň je pro všechny tři varianty shodné, že mezi jednotlivými lichoběžníky, tedy ve spoji, je chlazení vypnuto.



obr. 5-12: Tři strategie změny proudu vzduchu

Pro horní základnu lichoběžníku a klesající prut se průtok vzduchu pro jednotlivé varianty liší. Všechny tři varianty vychází z výsledků experimentů statistického plánování, ze kterých vyplývá, že množství vzduchu pro klesající pruty nemá výrazný vliv, a naopak je dosaženo lepších výsledků při nižším průtoku. Díky mírnějšímu chlazení bude na konci prutu více tepla, což bude mít za následek i více tepla ve spoji. U první varianty je v horní části lichoběžníku konstantní chlazení. Následně při tisku klesajícího prutu dochází k plynulému snížení proudu vzduchu až na nulu. Nájezd do spoje tak probíhá s již nechlazeným materiálem. Tato strategie se však ukázala jako nevhodná. Zhruba za půlkou prutu došlo k přílišnému snížení chlazení. Prut tak již nedržel tvar a začalo docházet k natahování nezchladlého materiálu. Tento jev můžeme sledovat na obr. 5-13, kdy se natažení projevuje zúžením prutu ve vyznačeném místě. Následně můžeme pozorovat hromadění materiálu ve spodní části prutu. Díky zúžení dochází k výraznému zmenšení průřezu prutu, což bude mít za následek snížení mechanických vlastností. Kvůli nevhodnosti strategie, nebyly vzorky tištěny touto strategií dále vyhodnocovány. Zároveň byla tímto nastavením prokázána nutnost vhodného nastavení chlazení a jeho významný vliv.



obr. 5-13: Vzorek tištění strategií změny proudu vzduchu a)

U strategie b) dochází ke snížení průtoku vzduchu už v horní části lichoběžníku. Na klesajícím prutu je poté konstantní chlazení na nižší hodnotě, konkrétně opět 20 l/min. Třetí navržená strategie je velmi podobná první. V horní části je ofuk konstantní, na klesajícím prutu poté lineárně klesá do nižší hodnoty 20 l/min. U těchto dvou strategií byla tisknutelnost v pořádku, byly tak vytištěny a vyhodnoceny vzorky kombinující tyto dvě strategie a dvě sady parametrů (tab. 5-2). Detailní parametry tisku a výsledky lze najít v příloze 1 kapitola 1.6. Pro oddělení vzorků od předchozích experimentů, začíná jejich číslování číslem 80 a pokračuje.

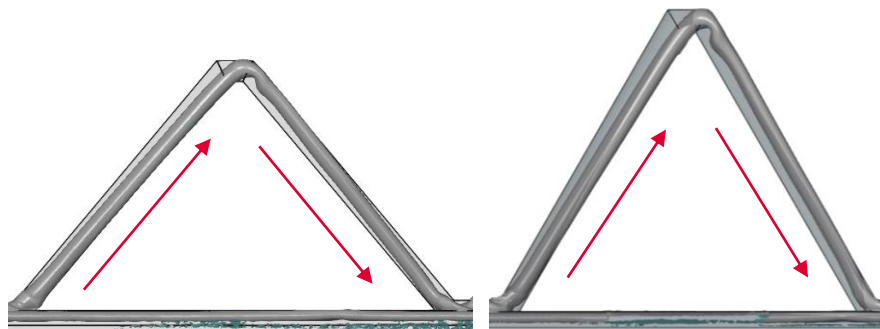
tab. 5-3: Výsledky úpravy průtoku vzduchu

Kombinace parametrů	Strategie průtoku vzduchu	Průměrná odchylka (mm)	Maximální odchylka (mm)
Kombinace 1	B	0,52±0,23	0,85
Kombinace 1	C	0,45±0,20	0,78
Kombinace 2	B	0,29±0,20	0,6
Kombinace 2	C	0,31±0,21	0,64

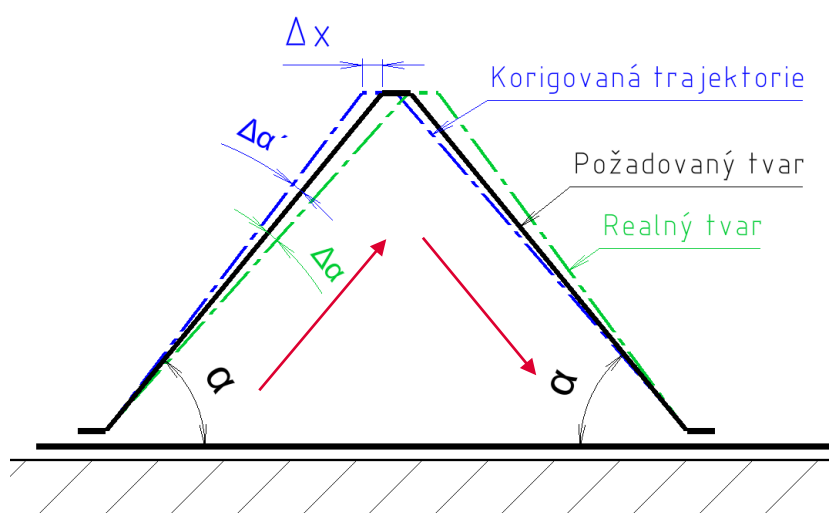
Výsledky experimentů jsou shrnuty v tab. 5-3. Z výsledků vyplývá, že s ohledem na přesnost je vhodnější druhá kombinace procesních parametrů. Zároveň lze říct, že všechny vytištěné vzorky splňují cíl práce, tedy maximální odchylku 1 mm. Při porovnání dvou strategií průtoku vzduchu, nelze určit jednoznačně vhodnější strategii. Pro kombinaci parametrů 1 vychází lepší výsledky se strategií C. Naopak u druhé kombinace procesních parametrů je dosaženo lepších výsledků se strategií B. Rozdíly jsou však velmi drobné, lze tak tedy prohlásit, že obě strategie jsou použitelné. Zároveň u obou strategií lze říct, že došlo k výraznému navýšení pevnosti ve spojích, kdy zde dochází minimálně k natavení mezi jednotlivými vlákny.

5.1.6 Zvýšení přesnosti pomocí korekce trajektorie

Při vyhodnocení tiskových strategií pro úpravu průtoku vzduchu bylo pozorováno obdobné odchýlení od ideálního tvaru (obr. 5-14). Na základě tohoto odchýlení byla vytvořena korekce tiskové dráhy (obr. 5-15). Korekce vychází z faktu, že horní základna lichoběžníku je ve správné výšce, avšak mírně posunutá doprava ve směru tisku. Také lze sledovat úhlový pokles stoupajícího prutu $\Delta\alpha$ proti ideálnímu tvaru.



obr. 5-14: Porovnání ideálního modelu a skenu



obr. 5-15: Schéma odchýlení a návrh korekce

Výsledná korekce tedy vznikne posunutím dvou horních bodů lichoběžníků, směrem doleva o Δx , bez změny jejich výšky od podložky. Posunutí Δx je definováno jako rozdíl původního a nového vrcholu. Kdy nový vrchol je definován jako průnik přímky sklopené o úhel $\Delta\alpha'$ od ideálního tvaru, a horní základny lichoběžníku. Úhel $\Delta\alpha'$ je poté roven úhlu $\Delta\alpha$, tedy úhlu odchýlení tištěného prutu od ideálního tvaru, má však opačný směr od přímky ideálního tvaru. Aby pro získání korekce nevznikla nutnost vždy vytisknout prut bez korekce, bude hodnota $\Delta\alpha$ brána ze statistického modelu na základě predikce. Díky ověření víme, že je tato hodnota blízká hodnotě reálné. Pro možnost porovnání výsledků s korekcí a bez korekce byly vytištěny vzorky se stejným nastavením jako u experimentů se změnou průtoku

vzduchu, tentokrát však s korekcí. Pro tyto vzorky pokračovalo číslování z předchozích experimentů.

tab. 5-4: Výsledky pro tisk s korekcí

Kombinace parametrů	Strategie průtoku vzduchu	$\Delta\alpha$ (°)	Průměrná odchylka (mm)	Maximální odchylka (mm)
Kombinace 1	B	1,2	0,22±0,12	0,49
Kombinace 1	C	1,2	0,16±0,12	0,44
Kombinace 2	B	0,8	0,15±0,11	0,36
Kombinace 2	C	0,8	0,22±0,12	0,49

Z tab. 5-4 a tab. 5-5 vyplívá, že zavedením korekce došlo k výraznému zlepšení přesnosti tisku. Toto zlepšení je výraznější u kombinace procesních parametrů 1, kdy průměrná odchylky od ideálního tvaru je méně než poloviční oproti tisku bez korekce. Zároveň lze prohlásit, že maximální odchylka na všech vzorcích je menší než 0,5 mm, tedy polovina stanoveného cíle. Ani po těchto experimentech však není možné rozhodnout, která varianta úpravy průtoku vzduchu je vhodnější. Pro první kombinaci parametrů je vhodnější varianta C, pro druhou kombinace parametrů je to poté varianta B. Pro další experimenty byla zvolena první kombinace procesních parametrů s variantou průtoku vzduchu C.

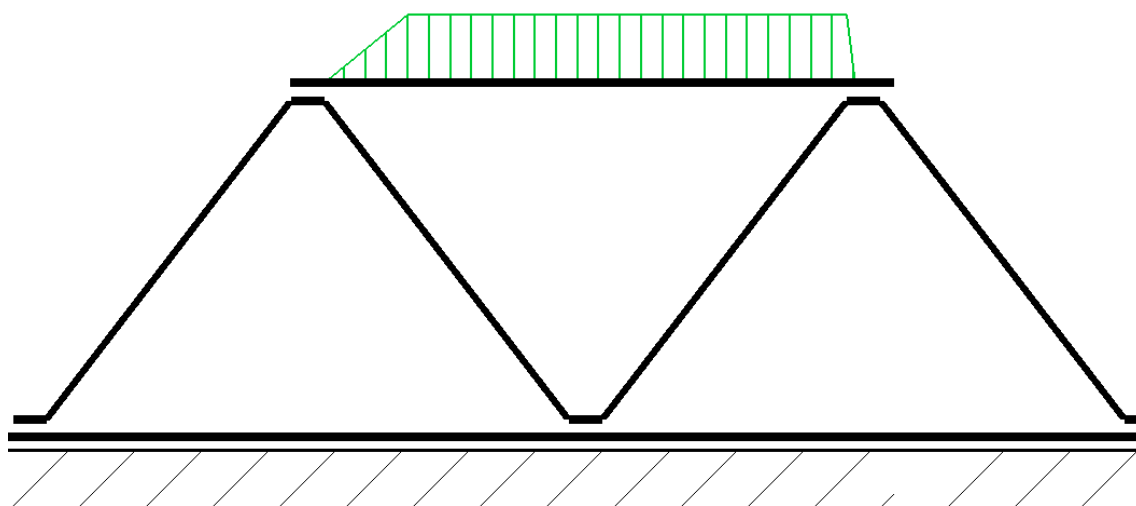
tab. 5-5: Porovnání výsledků s korekcí a bez korekce

Kombinace parametrů	Strategie průtoku vzduchu	Průměrná odchylka s korekcí (mm)	Průměrná odchylka bez korekcí (mm)	% průměrné odchylky bez korekce	Max. odchylka s korekcí (mm)	Max. odchylka bez korekcí (mm)	% maximální odchylky bez korekce
Kombinace 1	B	0,22	0,52	42 %	0,49	0,85	58 %
Kombinace 1	C	0,16	0,45	36 %	0,44	0,78	56 %
Kombinace 2	B	0,15	0,29	52 %	0,36	0,6	60 %
Kombinace 2	C	0,22	0,31	71 %	0,49	0,64	77 %

5.1 Vodorovné pruty

Po zjištění vhodných procesních parametrů a strategií pro tisk lichoběžníků, bylo dalším krokem zjištění vhodných procesních parametrů a strategií pro vodorovné pruty spojující vrcholy lichoběžníků. Pro tisk vodorovných prutů pak platí podobně jako pro klesající pruty, že se jedná o tisk mezi dvěma pevnými body. Mezi těmito body je tištěný prut napínán, což

zlepšuje jeho přesnost. Pro úvodní experimenty byly jako výchozí zvoleny procesní parametry zjištěné pro tisk lichoběžníků. Tedy kombinace procesních parametrů 1 s obdobou strategie proudu vzduchu jako u stoupajících prutů. Proud vzduchu byl v uzlech vypnut, při vyjetí z uzlu došlo k plynulému náběhu na požadovanou hodnotu, a při najetí do dalšího uzlu zase vypnut (obr. 5-16). Pro takto nastavené parametry tisku byly pozorovány velmi kvalitní výsledky, kdy se prut neprohýbal a na první pohled se zdál rovný a s dostatečnou přesností.



obr. 5-16: Strategie proudu vzduchu pro vodorovné pruty

Pro všechny experimenty s horizontálními pruty byly tisknuty vždy tři lichoběžníky, jejichž vrcholy byly následně spojeny. Díky tomu lze sledovat dva horizontální pruty na vzorku. Také však lze sledovat tři druhy napojení mezi vodorovným prutem a lichoběžníkem. Jedná se o napojení při nájezdu do tisku, napojení při přejezdu lichoběžníkem a o napojení při odjezdu z tisku. Nejdůležitějším je napojení při přejezdu lichoběžníkem, které bude tvořit většinu napojení při tisku větších prutových struktur. U všech vzorků byla zároveň vyhodnocena přesnost tisku lichoběžníků, díky čemuž bylo zajištěno více dat pro vyhodnocení aplikovaných metod a ověření opakovatelnosti tisku. Přesná data všech odchylek lze nalézt v příloze 1 v kapitole 2.

Tyto parametry byly použity pro tisk vzorků se základní strategií napojení popsanou v kap. 4.5.4, kdy se jedná pouze o přejezd nad lichoběžníkem s mírným přesahem pro vytvoření spoje. Snahou bylo zajištění co nejmenší vzdálenosti os vodorovného prutu a horní základny lichoběžníku. Díky tomu by došlo k většímu přesahu prutů a k jejich pevnějšímu provázání. Jako vhodná se ukázala hodnota vzdálenosti os 1,8 mm, tedy přesah 0,2 mm. Při větším přesahu docházelo k výraznější kolizi trysky extrudéru a vytištěného lichoběžníku. Tryska extrudéru vyhnula vytištěný lichoběžník do strany a následně pak docházelo k napojení horizontálního prutu na stranu lichoběžníku a ne na jeho horní část, což nelze požadovat za úspěšný tisk.

tab. 5-6: Výsledky bez strategie napojení

Strategie napojení	Průměrná odchylka (mm)	Maximální odchylka (mm)
Bez strategie, přejezd	0,30±0,07	0,4

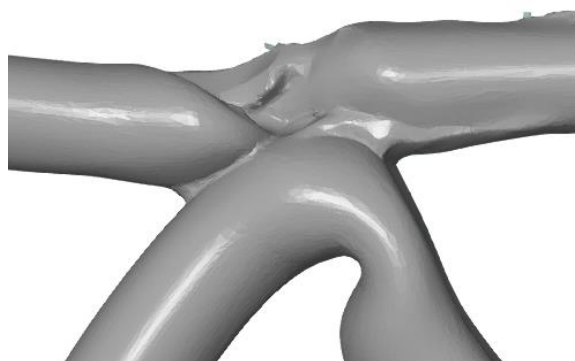
Z tab. 5-6 je patrné, že použité procesní parametry zajišťují dostatečnou přesnost tisku. Z výsledků měření je také zjevné, že nedochází k výraznějšímu průhybu ve středu prutu. Z tohoto důvodu bylo dále pokračováno s těmito parametry. Při hodnocení kvality napojení (obr. 5-17) lze sledovat jen mírné protavení, kdy nedochází k příliš pevnému spoji. Mimo to je kvalita spoje výrazně závislá na přesnosti tisku horní základny lichoběžníku, od čehož se odvíjí velikost přesahu. Díky nepřerušnému tisku nedochází k deformaci horní strany prutu, díky tomu nevznikne problém s napojováním dalších vrstev. Pro zvýšení pevnosti spoje tak budou zkoušeny strategie popsány v kapitole 4.5.4.



obr. 5-17: Detail napojení prutů pro strategii přejezdu

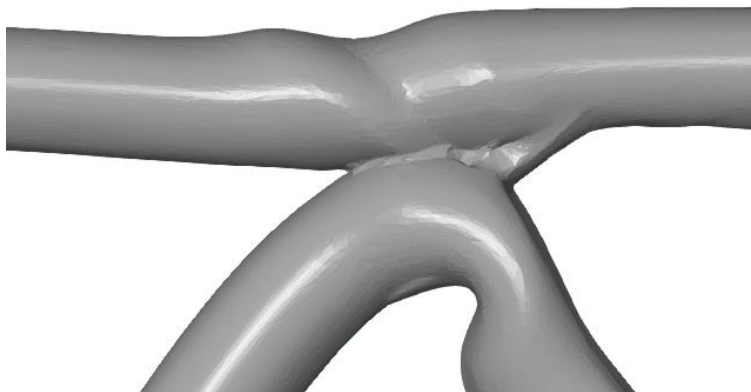
5.1.1 Použití strategií napojení

První použitou strategií je využití reorientace tiskové hlavy (strategie A). Při této strategii dochází k výraznému protavení materiálu (obr. 5-18). Zároveň však dochází k mírné deformaci konce prutu před napojením a díky rychlé změně směru tisku dochází k nekvalitní horní ploše nánosu, kdy při napojování dalších vrstev by mohlo docházet k problematickému napojování.



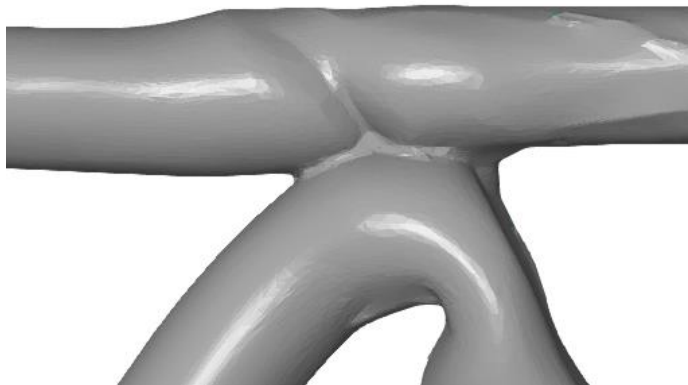
obr. 5-18: Detail napojení pomocí strategie A

Další strategie pracují se zjetím trysky extrudéru do již vytištěného materiálu. Vhodná hloubka zjetí do materiálu byla stanovena na 0,5 mm. Při větších hloubkách zjetí docházelo k problémům při tisku, jako přílišná deformace již vytištěného materiálu nebo ucpávání trysky extrudéru, což může způsobovat nespolehlivost tisku. Strategie B pracuje s najetím a vyjetím pod úhlem. V porovnání se strategií A nedochází k tak výraznému protavení, spoj je však výrazně pevnější než bez použití strategie. Horní plocha je však kvalitnější než v případě strategie A, i zde jde však vidět prohlubeň vzniklá pohybem extrudéru.



obr. 5-19: Detail napojení pomocí strategie B

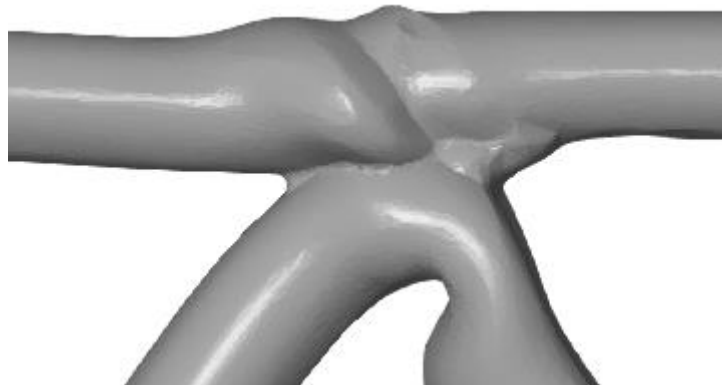
Strategie C pracuje s nájezdem do materiálu pod úhlem a kolmým výjezdem, tak aby byla vyplněna prohlubeň vzniklá u předchozí strategie. Na obr. 5-20 lze pozorovat, že tohoto jevu bylo dosaženo. Zároveň bylo dosaženo i lepšího protavení materiálu.



obr. 5-20: Detail napojení pomocí strategie C

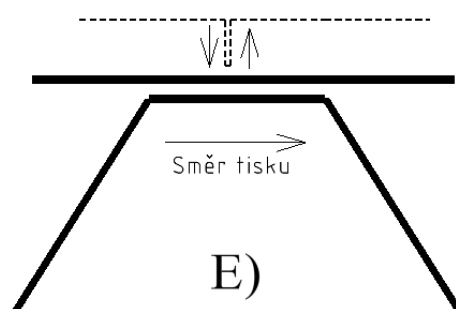
Strategie D vychází z předpokladu, že by mohlo být dosaženo lepšího protavení při kolmém nájezdu do materiálu. Oproti strategii C se tedy jedná o kolmý nájezd do materiálu a výjezd pod úhlem. Výsledky jsou velmi podobné výsledkům pro strategii C. Protavení a pevnost spoje jsou na kvalitní úrovni. Stejně tak horní plocha prutu je kvalitní. Na rozdíl od strategie

C dochází k rozšíření materiálu do stran. Toto může být výhodné především pro napojování prutů kolmých na rovinu tisku při tisku objemových struktur.



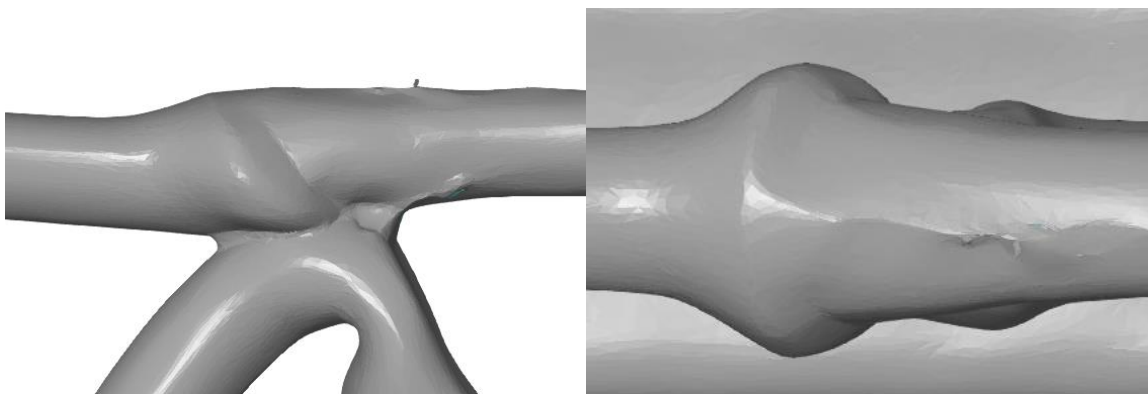
obr. 5-21: Detail napojení pomocí strategie D

Na základě získaných výsledků byla navržena další tisková strategie E, kdy se jedná o najetí nad střed horní základny lichoběžníku, kolmý nájezd do materiálu, a kolmý výjezd. Díky tomuto dojde v místě spoje k přeextrudování materiálu. Zároveň dojde k intenzivnějšímu prohrátí již vytištěného materiálu a kvalitnějšímu spoji.



obr. 5-22: Strategie napojení E

Díky této strategii dochází ke kvalitnímu protavení a dostatečně kvalitnímu spoji. Na obr. 5-23 vlevo je vidět, že horní plocha spoje je dostatečně rovná a vhodná pro další napojování. Vpravo pak lze vidět přeextrudování materiálu do stran.



obr. 5-23: Detail napojení pomocí strategie E

Při pohledu na geometrické odchylky vodorovných prutů (tab. 5-7) je patrné, že strategie napojení nemá výrazný vliv na přesnost tisku. Nejlepší výsledky vyšli pro strategii D. Důležité je však, že všechny odchylky vyšli menší než 0,5 mm, tedy polovinu požadované přesnosti. S ohledem na přesnost tak lze využít všechny strategie napojení.

tab. 5-7: Přehled odchylek vodorovných prutů pro jednotlivé strategie napojení

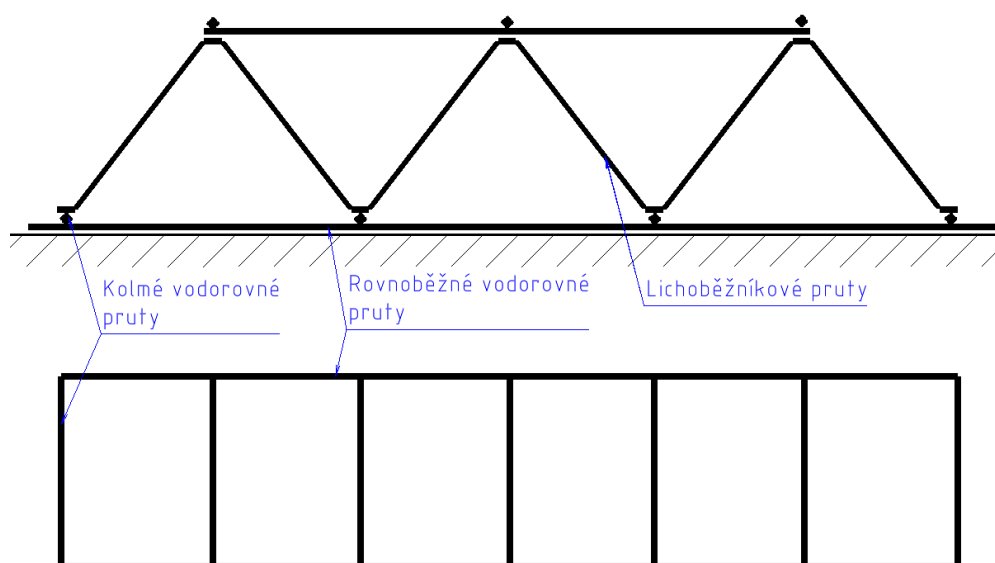
Strategie	Průměrná odchylka (mm)	Maximální odchylka (mm)
-	0,30 ± 0,07	0,40
A	0,21 ± 0,14	0,38
B	0,27 ± 0,09	0,40
C	0,25 ± 0,10	0,37
D	0,16 ± 0,10	0,36
E	0,28 ± 0,12	0,43

Průměrná geometrická odchylka pro lichoběžníky byla $0,22 \pm 0,14$ mm. Maximální odchylka pak byla 0,54 mm. Jedná se tedy o mírně horší výsledky, než kterých bylo dosaženo dříve. Většina odchylek se však stále pohybuje pod hranicí 0,5 mm, jsou zde tedy ještě výrazné rezervy pro překročení maximální požadované odchylky. Tisk tak lze prohlásit za stabilní a opakovatelný.

5.2 Objemové struktury

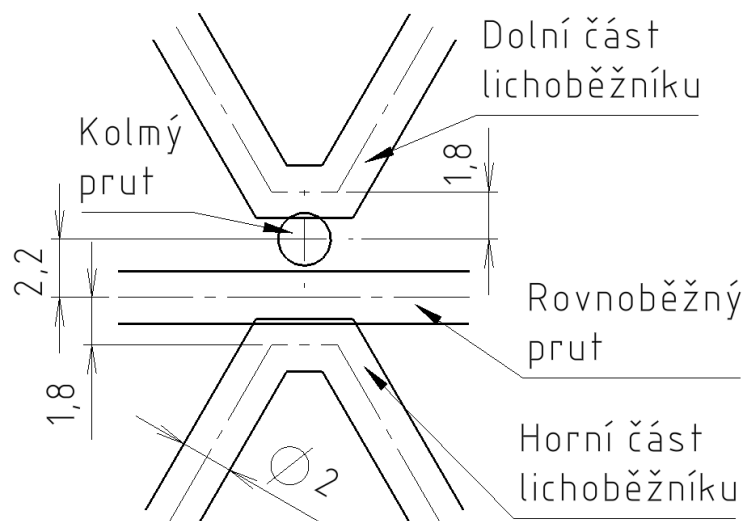
Po zjištění vhodného nastavení procesních parametrů a tiskových strategií pro tisk lichoběžníků a vodorovných prutů bylo dalším krokem spojení těchto znalostí, tak aby bylo možné pomocí prutových struktur vyplňovat objem. Jako základní model prostorové struktury poslouží model popsáný v kapitole 4.5.5. Jedná se o soustavu několika rovnoběžných nánosů, které jsou vzájemně provázány. Díky takto jednoduché geometrii je zajištěno zamezení kolize tiskové hlavy s již vytištěným materiálem. Zároveň je zde možné aplikovat poznatky získané v předchozích kapitolách. Objemovou strukturu tak lze rozdělit na tři hlavní prvky, které jsou na sebe opakovaně vrstveny. Jako první jsou vždy vytištěny široké podpůrné linky pod lichoběžníkovými pruty, které zajišťují dostatečné přilnutí k podložce. U předchozích experimentů na tyto podpůrné linky byly tištěny přímo lichoběžníky. Pro objemové struktury byla zvolena změna, kdy na tyto podpůrné linky byly první vytištěny rovnoběžné vodorovné pruty, jedná se tak o první opakovanou vrstvu. Další vrstvou pak byl tisk kolmých vodorovných prutů, vytvářející mřížku. Na tuto mřížku byly následně tištěny už lichoběžníky, jako třetí opakovaná vrstva. Vrcholy lichoběžníků byly

propojeny opět rovnoběžnými vodorovnými pruty, na které byly vytištěny kolmé vodorovné pruty, a tak stále dokola do dosažení požadovaného počtu vrstev.



obr. 5-24: Schéma objemové struktury

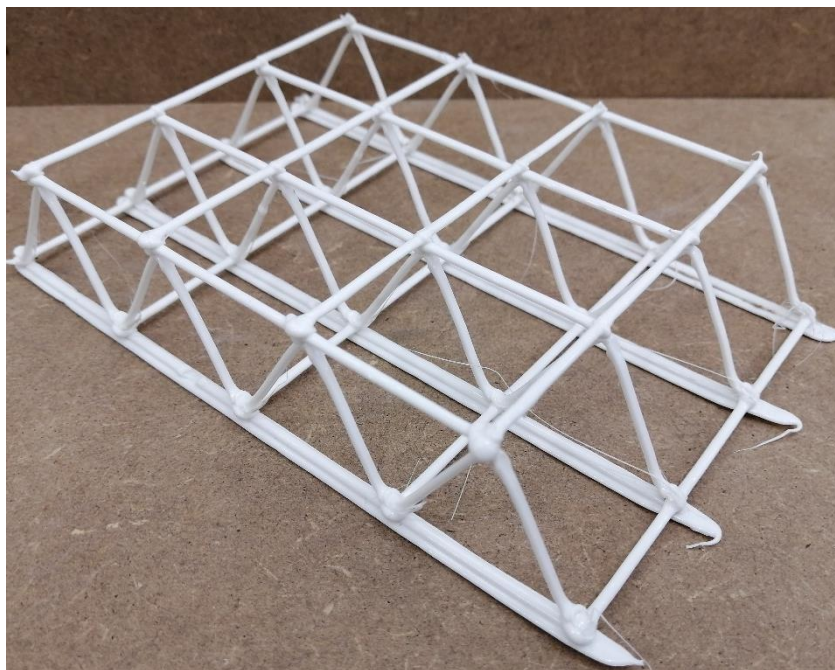
Pro napojování jednotlivých vrstev mezi sebou byla zvolena tisková strategie E z kapitoly 5.1.1. Přestože se nejedná o strategii s nejlepšími výsledky, byla tato strategie zvolena především kvůli kolmému nájezdu a výjezdu do a z materiálu. Toto je vhodné především u napojování na sebe kolmých prutů, kde není efektivní vytvářet napojení s dlouhými nájezdy nebo odjezdy pod úhlem, jako je tomu u ostatních strategií. Tato strategie byla také využita při napojování lichoběžníku na už vytištěný materiál.



obr. 5-25: Schéma nastavení hladin v uzlu

Při napojování kolmých prutů vznikl problém, kdy při přesahu 0,2 mm používaném pro napojování docházelo k výraznému vyhnutí již vytištěných prutů a následně k nevhodnému

provázání. Toto je způsobeno právě kolmým nájezdem, kdy v tomto směru má struktura nízkou tuhost a tryska působí na velké páce. Z tohoto důvodu byla zvětšena vzdálenost mezi pruty na 2,2 mm (obr. 5-25). Toto zajistí projetí trysky nad již vytištěnými pruty a následné napojení pomocí strategie E kolmo dolů. Vzhledem k tomu, že vzdálenost mezi osami prutů byla zvětšena o 0,4 mm, musí být zvětšena i délka vniknutí do materiálu, tak aby byla zajištěna dostatečná kvalita spoje. Nová délka vniknutí je tak pro kolmé vodorovné pruty 0,9 mm oproti původním 0,5 mm. Na obr. 5-26 lze následně vidět fotografii vytištěné objemové struktury s takto nastavenými parametry.



obr. 5-26: Fotografie vytištěné objemové struktury

Pro objemové struktury byla testována především tisknutelnost. Nebyla tak už vyhodnocována přesnost jednotlivých prutů. Díky faktu že bylo vyhodnoceno poměrně velké množství vzorku pro lichoběžníkové a horizontální pruty, které s dostatečnou rezervou splňovaly požadovanou toleranci, lze předpokládat, že i při zvýšení nepřesnosti tisku budou pruty objemových struktur splňovat tuto toleranci.

6 DISKUZE

6.1 Procesní parametry a tiskové strategie

Při stanovování vhodných procesních parametrů bylo využito metody statistického plánování experimentu, pomocí které byl sestaven statistický model. Z modelu je možné odečíst vlivy jednotlivých parametrů a jejich kombinací. Je však nutné myslet na fakt, že se jedná o vlivy těchto parametrů ve zkoumaném rozsahu. Při změně rozsahu parametrů by pravděpodobně došlo i ke změně jejich vlivů. Z grafů jednotlivých vlivů je však patrné, že minima funkcí daných vlivů leží ve zkoumaných rozsazích, lze tak navržené rozsahy považovat za dostatečné.

Statistický model také umožňuje predikci geometrických odchylek na základě vložených parametrů. Správnost těchto predikcí byla ověřena, avšak jen pro určité kombinace. Tyto kombinace byly zvoleny na základě optimalizace, kdy požadovaným výsledkem byla nulová odchylka. Přesnost modelu pro kombinace parametrů, jejichž výsledkem budou velké odchylky, nebyla ověřena, a to především proto, že tvorba takovýchto kombinací parametrů je v rozporu s cílem práce.

Zjištěné parametry a jejich závislosti byly stanoveny pro materiál PLA, který byl zvolen na základě rešerše. Při požadavku jiného materiálu by musely být nalezeny nové závislosti vhodné pro tento materiál. Oproti tomu navržené a testované tiskové strategie by měli být funkční nezávisle na použitém materiálu. Jedná se především o tiskové strategie změny proudu chladicího vzduchu pro zvýšení pevnosti ve spojích a tiskové strategie napojení jednotlivých prutů na pruty již vytištěné. Strategie úpravy trajektorie pro zvýšení přesnosti tisku by však pro jiný materiál fungovat nemusela. Hlavním důvodem je fakt, že korekce vychází z deformace použitého materiálu, při použití jiného materiálu by pak tato deformace mohla být jiná a strategie nevhodná.

Cílem práce bylo dosažení takové přesnosti, aby maximální odchylka byla 1 mm. Po zavedení korekce trajektorie byla dosažena přesnost tisku s maximální odchylkou 0,49 mm a s průměrnou odchylkou 0,22 mm. Maximální odchylka tedy byla na více než polovině maximální povolené nepřesnosti. Při pozdějším tisku nepřesnost mírně vzrostla, i tak však byla v limitu s dostatečnou rezervou. Hlavní výhodou korekce je její jednoduchost, kdy celá korekce vychází z jednoho parametru získaného ze statistického modelu. Díky korekci bylo dosaženo v nejlepším případě 36 % průměrné odchylky bez korekce a 56 % maximální odchylky bez korekce. Liu [27] byl jedním z mála autorů, který se věnoval přesnosti tisku prutů. Zavedením výrazně složitějších korekcí dosáhl 10 % chyby bez korekcí. Autor však neuvádí, zdali tohoto zlepšení dosáhl čistě pomocí korekcí nebo i pomocí úpravy procesních parametrů. Autor také bohužel uvádí odchylky pouze jako procentuální chybu a neuvádí reálné hodnoty odchylek, výsledky tak nelze porovnat.

Většina autorů, kteří uvádějí tiskové strategie v uzlech [17, 25, 30], využívá v uzlech krátkého zastavení. Vhodně zvolené parametry a tiskové strategie popsány v této práci umožňují plynulý a zároveň dostatečně přesný tisk bez zastavení a s dosažením dostatečně kvalitních napojení v uzlech.

6.2 Možné zdroje chyb

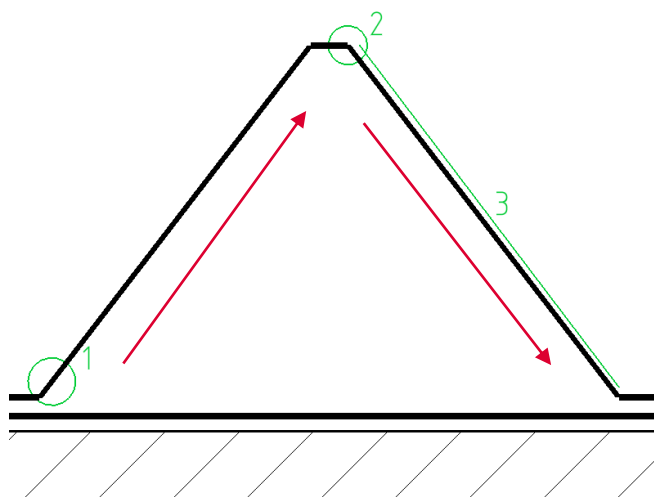
Celý proces řešení od tisku po vyhodnocení je zatížen možnými zdroji chyb. Při tisku je nutné počítat hned s několika zdroji. Prvním z nich je opakovatelnost polohování robotického ramene. Vliv tohoto možného zdroje chyby je minimalizován použitím robotického ramene s vysokou přesností. Další možnou nepřesností může být zkalibrování nulového bodu nástroje. Opakovaná poloha nástroje při jeho montáži je zajištěna pomocí kolíků na přírubě robota. Při extruzi materiálu není kontrolován prokluz materiálu v podávacím mechanismu. Díky tomu může docházet k prokluzu a následně menší než požadované extruzi, což může mít vliv na vlastnosti výtisku. Dalším možným faktorem ovlivňujícím výsledky je teplota a vlhkost vzduchu v laboratoři. Tyto veličiny se v průběhu řešení měnily, jejich hodnoty byly zaznamenávány, nebyl však řešen jejich vliv.

Dalšími možné zdroje chyb vznikají při vyhodnocování vzorků. Chyba může vzniknout už při samotném skenování díky nepřesnosti 3D skeneru. Jedná se však o velmi robustní a přesnou technologii, vliv této nepřesnosti tak lze téměř zanedbat. Větší chyba může nastat při zarovnávání získaných 3D skenů s modelem reprezentujícím ideální tvar. Nepřesnost zarovnání může vznikat především u skenů prutů s velkými odchylkami, a to především proto, že zarovnání je prováděno právě pomocí nepřesného prutu. Díky kontrole správnosti zarovnání by tato chyba měla být však minimalizována.

Možné zdroje chyb jako přesnost polohování robotického ramene či přesnost 3D skeneru lze minimalizovat díky několikanásobnému opakování a využití statistických metod. Chyby jsou tak průměrovány a jejich vliv se snižuje.

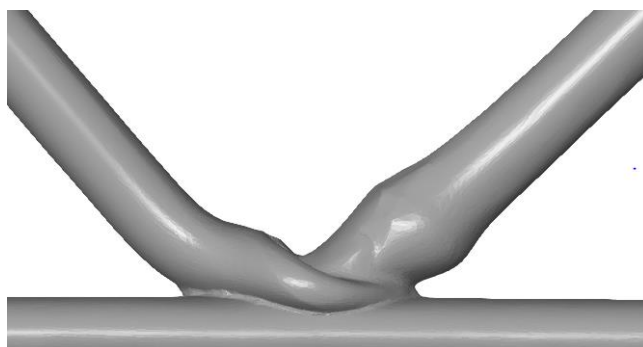
6.3 Nedostatky tisku

Při tisku a následném vyhodnocování bylo pozorováno několik vad na tištěných modelech. Pozorovány byly především tři vady, zvýrazněny na obr. 6-1. První vada vznikala na začátku stoupajícího prutu, druhá na začátku klesajícího prutu a třetí lze pozorovat po celé délce klesajícího prutu.



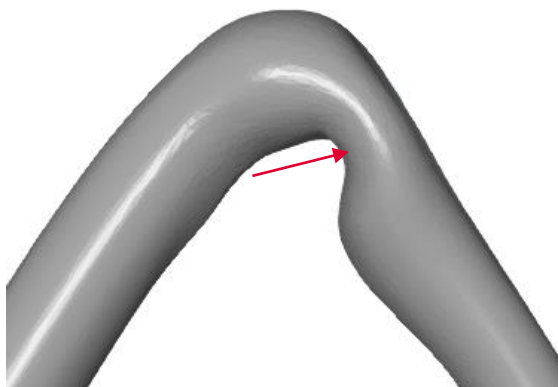
obr. 6-1: Tři pozorované nedokonalosti tisku

První tisková vada vznikající na začátku stoupajícího prutu je způsobena strategií napojení pomocí reorientace tiskové hlavy. U výtisků tištěných bez sklopené tiskové hlavy tento jev nebyl pozorován, protože zde nedocházelo k reorientaci nástroje. Právě reorientace hlavy způsobuje mírnou změnu rychlosti pohybu, díky tomu pak vzniká v patě stoupajícího prutu krček a následné přextrudování. Takto vytvořené zúžení může mít následně negativní vliv na mechanické vlastnosti struktury. Tento problém byl vyřešen změnou strategie napojení na strategii E popsanou v kapitole 5.1.1, u které nedochází k reorientaci tiskové hlavy.



obr. 6-2: Tisková vada na začátku stoupajícího prutu

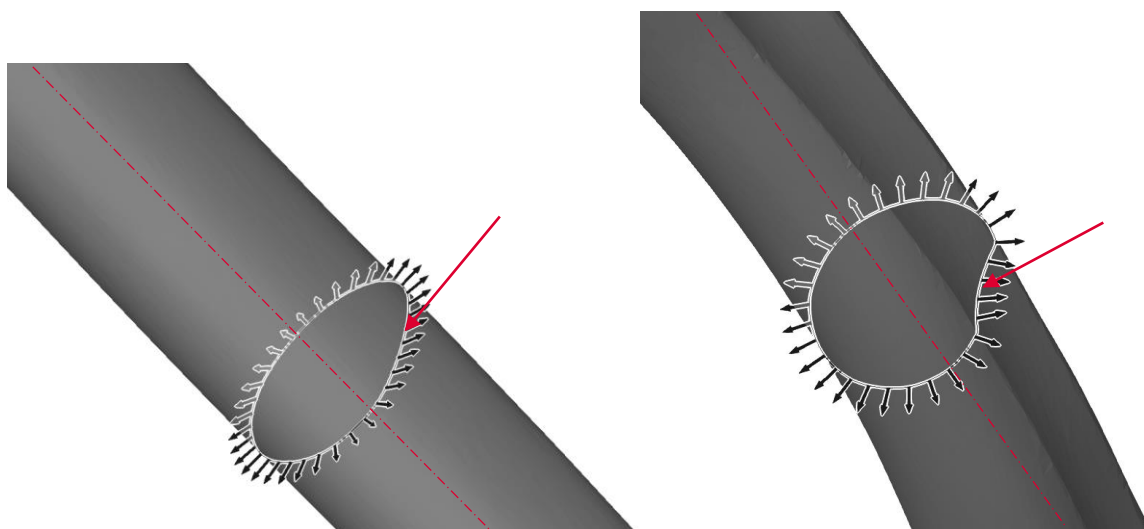
Druhá výrazná tisková vada vzniká podobně jako první na začátku prutu, tentokrát však na začátku prutu klesajícího. Zde dochází k tvorbě zúžení a následného přextrudování. K tomuto jevu dochází díky změně směru tisku. Při změně směru pohybu směrem dolů směřuje tryska extrudéru do již vytištěného, částečně zchladlého materiálu. Není tak prostor kam extrudovat materiál, díky čemuž dochází ke zvýšení tlaku v trysce. Po dalším posunu dojde k uvolnění trysky a vyextrudování většího množství materiálu, který svou vahou mírně poklesne, díky čemuž dojde k vytvoření zúžení a následné boule (obr. 6-3).



obr. 6-3: Tisková vada vznikající na začátku klesajícího prutu

Při řešení práce byla snaha tomuto jevu zabránit pomocí různých strategií. Jednalo se například o změnu extruze v daném bodě, či úpravu proudu chladicího vzduchu. Žádnou z úprav však nebylo dosaženo odstranění tohoto nedostatku.

Poslední výrazný nedostatek vznikal na klesajícím prutu. Konkrétně se jedná o změnu průřezu prutu. U prutu tištěného směrem vzhůru má prut pravidelný kruhový průřez, avšak u prutu tištěného směrem dolů dochází vlivem vzájemného působení trysky extrudéru a tištěného materiálu (obr. 5-8) k modifikaci průřezu. Průřez má následně ledvinovitý tvar. Z vyhodnocených vzorků je patrné, že zásadní vliv na tento jev má úhel stoupání prutu a úhel sklopení tiskové hlavy. Nejméně je jev patrný při nižších úhlech a velkých sklopeních (obr. 6-4 vlevo). Zde je vidět pouze drobné zploštění na horní straně prutu. Naopak velmi výrazný je tento jev při velkých úhlech a malých sklopeních tiskové hlavy jak lze vidět na vzorku 10 na obr. 6-4 vpravo, kde je tryskou v kruhovém průřezu vytvořena v horní části prutu drážka.

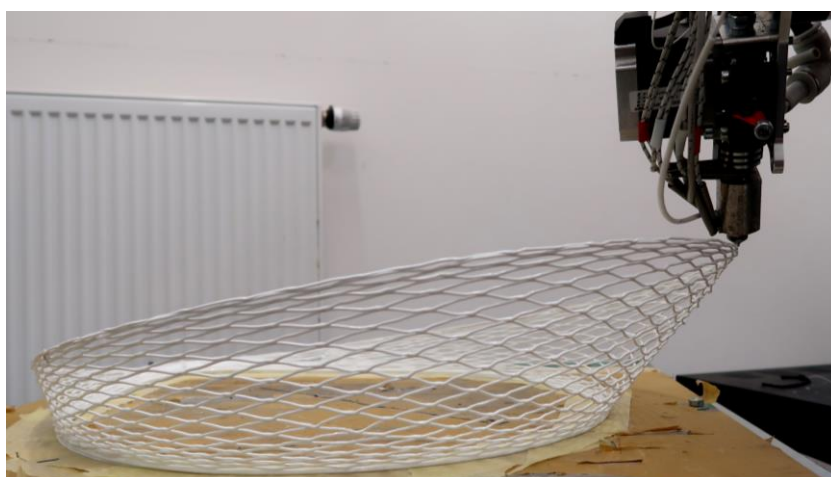


obr. 6-4: Průřezy vzorků 6 a 10

Na základě pozorování byl tento jev vyhodnocen u několika vzorků. Ukázalo se že, plocha průřezu se téměř nemění. Díky změně tvaru však může docházet ke změně kvadratických momentů průřezu a tak ke změně vzpěrné stability prutu. U vzorků vytištěných se zvolenými vhodnými parametry nebyl tento jev příliš výrazný, proto nebyly vytvořeny strategie pro zabránění jeho vzniku.

6.4 Aplikace poznatků

Ve své diplomové práci se studentka oboru průmyslového designu Adéla Mandáková věnuje návrhu krytu klimatizační jednotky vyráběného pomocí aditivní robotické výroby. Část bočního krytu je tvořena prutovou strukturou. Při výrobě tak bylo využito poznatků získaných v této práci. Na rozdíl od zkoumaných přímých prutů se jedná o zaoblené pruty. Celá struktura je navíc na oblém tvaru s výrazným převísem. Pro úspěšné vytištění modelu bylo tudíž nutné aplikovat vhodné procesní parametry a tiskové strategie. Zásadní bylo vhodné naklopení tiskové hlavy a strategie průtoku vzduchu pro dosažení správného tuhnutí materiálu spolu s dostatečnou pevností uzlů. Fotografii z tisku prutové struktury lze vidět na obr. 6-5.



obr. 6-5: Tisk prutové struktury s aplikovanými poznatky

6.5 Vědecká otázka a hypotézy

Vědecká otázka:

Které procesní parametry jsou klíčové pro tisknutelnost, přesnost tisku a kvalitní spojení prutových struktur při robotické aditivní výrobě?

Hypotéza 1:

Parametry nejvíce ovlivňující vystavitelnost budou parametry spojené s chlazením. Především tedy množství vzduchu a vhodné napolohování ofukové trysky.

Z výsledků statistického modelu vychází, že průtok ofukového vzduchu nemá ve zkoumaném intervalu příliš velký vliv na přesnost výtisků. Z pohledu samotné vystavitelnosti je však zcela zásadní. Při nepoužití chlazení nebo nedostatečném chlazení je struktura nevystavitelná. U ostatních parametrů jako délka prutu, úhel prutu nebo naklopení tiskové hlavy je struktura vystavitelná téměř vždy (při dostatečném chlazení) i když nepřesně. Rychlost tisku je pak závislá právě na průtoku vzduchu. Kdy se stoupající rychlosti je nutné zvyšovat proud vzduchu pro dostatečný odvod tepla.

Díky faktu že bez chlazení nánosu vzduchem je struktura nevystavitelná lze považovat hypotézu 1 za pravdivou.

Hypotéza 2:

Pomocí správné orientace tiskové hlavy lze dosáhnout zvýšení přesnosti tisku.

Hypotéza vychází z práce [15] kdy naklopením tiskové hlavy byla zvýšena tisknutelnost a přesnost výtisků. Ze statistického modelu pak vyplývá, že správné naklopení tiskové hlavy je zcela zásadní pro přesnost tisku. Jak z modelu, tak z následných optimalizací parametrů vyplývá, že nejvhodnější je sklopení tiskové hlavy zhruba pod úhlem $30^\circ \div 40^\circ$ v závislosti na úhlu stoupání prutu a dalších parametrech. Lze tedy prohlásit, že vhodná orientace tiskové hlavy je zásadní pro zvýšení přesnosti tisku, tedy že hypotéza 2 je pravdivá.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá tvorbou polymerních prostorových prutových struktur bez nutnosti podpor. Pro výrobu takovýchto struktur bylo využito technologie robotického 3D tisku. V rámci práce byla zpracována rešerše, na základě které byly stanoveny některé postupy a parametry. Na základě rešerše byl také zvolen materiál PLA využívaný pro všechny experimenty. Cílem práce bylo stanovení vhodných procesních parametrů a tiskových strategií se zaměřením na vystavitelnost a přesnost tištěných modelů. Práce je následně rozdělena na tisk lichoběžníků pro vyplnění velkých objemů, tisk vodorovných prutů a následnou kombinaci získaných poznatků pro tisk objemových struktur. Pro dosažení cíle práce byl sestaven statistický model sloužící pro identifikaci vlivů jednotlivých parametrů, predikci výsledků a optimalizaci parametrů pro tisk lichoběžníků. Pro možnost sestavení statistického modelu bylo nutné provést velké množství prvotních experimentů, na základě kterých byly stanoveny okrajové podmínky pro metodu statistického plánování experimentu. Při těchto experimentech byla zjištěna zásadní významnost chlazení. Data geometrických odchylek pro sestavení modelu byla získána pomocí technologie 3D optické digitalizace. Po sestavení statistického modelu byly provedeny ověřovací experimenty pro zjištění správnosti modelu. Tyto ověřovací experimenty byly zkombinovány s optimalizací procesních parametrů pro dosažení co nejvyšší přesnosti tisku. Díky těmto experimentům proběhlo ověření pravdivosti statistického modelu a zároveň nalezení vhodných kombinací parametrů pro dosažení co nejmenších geometrických odchylek od ideálního tvaru. Z modelu také vyplývá, že zásadní vliv na přesnost mají parametry úhlu prutu a naklopení tiskové hlavy. Pro získané kombinace parametrů byly testovány různé tiskové strategie pro zvýšení přesnosti tisku a kvality spojů. Takto nalezené procesní parametry a tiskové strategie umožnily tisk s průměrnou odchylkou 0,22 mm a maximální odchylkou 0,54 mm. Odchyly takovýchto velikosti splňují s dostatečnou rezervou cíl práce, tedy dosáhnout maximální odchylky 1 mm. Po získání vhodného nastavení pro tisk lichoběžníků bylo zkoumáno vhodné nastavení pro vodorovné pruty. Zde se práce zaměřovala především na strategie napojení prutů v uzlech. Po získání vhodného nastavení jak pro tisk lichoběžníkových struktur, tak pro tisk vodorovných prutů byli tyto znalosti zkombinovány pro tisk objemových struktur. Tisk takto navržené struktury byl následně úspěšně otestován, byl tak splněn cíl práce a zároveň byly potvrzeny obě stanovené hypotézy. Dalším krokem ve výzkumu polymerních prostorových struktur by mělo být zamření se na mechanické vlastnosti takto vyráběných struktur, tuto problematiku však práce už neřeší.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] 3DPRINT.COM. *Branch Technology 3D Prints Building Walls*. [vid. 18. březen 2020]. Dostupné z: <https://3dprint.com/85215/branch-3d-printed-walls/>
- [2] ZHANG, Y., R. D. ADAMS a Lucas F.M. DA SILVA. A rapid method of measuring the glass transition temperature using a novel dynamic mechanical analysis method. *Journal of Adhesion*. 2013, roč. 89, č. 10, s. 785–806. ISSN 00218464.
- [3] BALANI, Kantesh, Vivek VERMA, Arvind AGARWAL a Roger NARAYAN. Physical, Thermal, and Mechanical Properties of Polymers. *Biosurfaces*. 2015, s. 329–344.
- [4] YULIESTYAN, A., A. A. CUADRI, M. GARCÍA-MORALES a P. PARTAL. Influence of polymer melting point and Melt Flow Index on the performance of ethylene-vinyl-acetate modified bitumen for reduced-temperature application. *Materials and Design*. 2016, roč. 96, s. 180–188. ISSN 18734197.
- [5] ZEMAN, Lubomír. *Vstřikování plastů*. Praha: Grada Publishing, 2018. ISBN 978-80-247-2818-6.
- [6] Prestogroup. [vid. 3. duben 2020]. Dostupné z: <https://www.prestogroup.com/blog/quality-check-of-polymer-using-melt-flow-index-tester/>
- [7] ANDERSON, D. R. Thermal conductivity of polymers. *Chemical Reviews*. 1966, roč. 66, č. 6, s. 677–690. ISSN 15206890.
- [8] BĚHÁLEK, Luboš. *Polymery*. Liberec: Code Creator, 2016. ISBN 978-80-88058-68-7.
- [9] WUNDERLICH, B. The heat capacity of polymers. *Thermochimica Acta*. 1997, roč. 300, č. 1–2, s. 43–65. ISSN 00406031.
- [10] NGO, Tuan D., Alireza KASHANI, Gabriele IMBALZANO, Kate T.Q. NGUYEN a David HUI. Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018, roč. 143, č. December 2017, s. 172–196. ISSN 13598368.
- [11] SPECIALCHEM SA. *Glass Transition Temperature*. [vid. 5. duben 2020]. Dostupné z: <https://omnexus.specialchem.com/polymer-properties/properties/glass-transition-temperature>
- [12] RAHMAN, Miftahur, N. R. SCHOTT a Lakshmi Kanta SADHU. Glass Transition of ABS in 3D Printing. *Comsol Boston 2016*. 2016, s. 3.
- [13] SD3D. [vid. 4. duben 2020]. Dostupné z: <https://www.sd3d.com/3d-printing/materials/>
- [14] KREJČÍŘÍK, Petr. *Bezpodporový 3D tisk na 6-ti osém robotickém rameni*. B.m., 2018. Vysoké učení technické v Brně.
- [15] KREJCIRIK, Petr, David SKAROUPKA a David PALOUSEK. Free directional robotic deposition - Influence on overhang printability. *MM Science Journal*. 2018, roč. 2018, č. December, s. 2715–2721. ISSN 18050476.

- [16] SUN, Q, Gm M RIZVI, Ct T BELLEHUMEUR a P GU. Experimental Study of the Cooling Characteristics of Polymer Filaments in FDM and Impact on the Mesostuctures and Properties of Prototypes. *Solid Freeform Fabrication Proceedings*. 2003, č. 403, s. 313–323.
- [17] MUELLER, Stefanie, Sangha IM, Serafima GUREVICH, Alexander TEIBRICH, François GUIMBRETIERE a Patrick BAUDISCH. WirePrint: Fast 3D Printed Previews. *Proc. UIST*. 2014, č. Figure 2, s. 273–280.
- [18] HUANG, Yijiang, Juyong ZHANG, Xin HU, Guoxian SONG, Zhongyuan LIU, Lei YU a Ligang LIU. FrameFab. *ACM Transactions on Graphics*. 2016, roč. 35, č. 6, s. 1–11. ISSN 07300301.
- [19] HUANG, Yijiang, Josephine CARSTENSEN, Lavender TESSMER a Caitlin MUELLER. *Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design 2018*. Cham: Springer International Publishing, 2019. ISBN 978-3-319-92293-5.
- [20] AIBUILD. *AI Build - technology*. [vid. 20. března 2020]. Dostupné z: <https://ai-build.com/technology.html>
- [21] BOYD, Robert Platt. *Branch Technology*. [vid. 18. března 2020]. Dostupné z: <https://www.branch.technology/>
- [22] BOYD, Robert Platt, Christopher WELLER, Anthony DISANTO, Melody REES a Bruce HILBERT. Cellular Fabrication and Apparatus for Additive Manufacturing. 2017, roč. US2017, č. 19.
- [23] HACK, Norman a Willi Viktor LAUER. Mesh-Mould: Robotically Fabricated Spatial Meshes as Reinforced Concrete Formwork. *Architectural Design*. 2014, roč. 84, č. 3, s. 44–53. ISSN 00038504.
- [24] HELM, Volker, Jan WILLMANN, Andreas THOMA, Luka PIŠKOREC, Norman HACK, Fabio GRAMAZIO a Matthias KOHLER. Iridescence Print: Robotically Printed Lightweight Mesh Structures. *3D Printing and Additive Manufacturing*. 2015, roč. 2, č. 3, s. 117–122. ISSN 23297670.
- [25] DE GUEVARA, Manuel Ladron, Luis BORUNDA, Jeremy FICCA, Daragh BYRNE a Ramesh KRISHNAMURTI. Robotic free-oriented additive manufacturing technique for thermoplastic lattice and cellular structures. *Intelligent and Informed - Proceedings of the 24th International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia, CAADRIA 2019*. 2019, roč. 2, s. 333–342.
- [26] ISHAK, Ismayuzri Bin a Pierre LAROCHELLE. MotoMaker: a robot FDM platform for multi-plane and 3D lattice structure printing. *Mechanics Based Design of Structures and Machines*. 2019, roč. 47, č. 6, s. 703–720. ISSN 15397742.
- [27] LIU, Shuting, Yingguang LI a Nanya LI. A novel free-hanging 3D printing method for continuous carbon fiber reinforced thermoplastic lattice truss core structures. *Materials & Design*. 2018, roč. 137, s. 235–244. ISSN 02641275.
- [28] JOKIĆ, Saša a Petr NOVIKOV. *Mataerial*. 2014 [vid. 21. března 2020]. Dostupné z: <http://www.mataerial.com/#firstPage>
- [29] SHI, Ji. ROBOTIC EXTRUSION(6-Axis KUKA+ABS 3D Printing) on Behance. *Research of Digital Craftsmanship & Autonomous Fabrication*. 2015 [vid. 19. března 2020]. Dostupné z: [https://www.behance.net/gallery/22536831/ROBOTIC-EXTRUSION\(6-Axis-KUKAABS-3D-Printing\)](https://www.behance.net/gallery/22536831/ROBOTIC-EXTRUSION(6-Axis-KUKAABS-3D-Printing))

- [30] HUANG, Yijiang, Juyong ZHANG, Xin HU, Guoxian SONG, Zhongyuan LIU, Lei YU a Ligang LIU. FrameFab: robotic fabrication of frame shapes. *ACM Transactions on Graphics*. 2016, roč. 35, č. 6, s. 1–11. ISSN 0730-0301.
- [31] KR 30 , 60 HA Assembly instruction. *Kuka roboter GmbH*. 2012, č. May, s. 1–177.
- [32] *KUKA-The versatile robots for the medium payload category*. [vid. 20. prosinec 2020]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/>
- [33] *Zebicon*. [vid. 23. leden 2021]. Dostupné z: <https://www.zebicon.com/en/metrology-systems/3d-scanning/atos-triple-scan/>
- [34] ATOS II and III Triple Scan. *GOM mbH*. 2011, roč. 49, č. 0.
- [35] *PLA Extrafill Datasheet*. [vid. 23. leden 2021]. Dostupné z: https://www.dropbox.com/sh/93ijxvlp6bi2tj/AAAkLzIumTXNz_cZKK_6wS6a?dl=0&preview=Technical+Data+Sheet_PLA+Extrafill_03012019.pdf

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratky

FDM	Fused Deposition Modeling
3D	trojrozměrný
MFI	index toku taveniny
ABS	Akrylonitril-butadien-styren
PLA	Polylactic acid
PET	Poly-etylén-tereftalát
PC	Polycarbonate
CAD	Computer-aided design
MIT	Massachusetts Institute of Technology

Veličiny

T_g	teplota skelného přechodu
T_f	teplota viskózního toku
T_d	teplota tepelné degradace
λ	součinitel tepelné vodivosti
c_p	měrná tepelná kapacita
F_g	gravitační síla
F_c	síla v kontaktu mezi vlákny
F_t	síla extruze
F_e	síla extruze
F_x, F_y	osové složky síly
α	úhel prutu od podložky
$\Delta\alpha$	úhlová odchylka prutu
β	úhel sklopení tiskové hlavy od svislé osy

Jednotky

W	Watt
J	Joule
m	metr
kg	kilogram
K	Kelvin
Pa	Pascal

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 1-1: 3D tisk prostorových struktur [1]	15
obr. 2-1: Deformační vlastnosti u polymorfních polymerů [2]	16
obr. 2-2: Kapilární viskozimetr [6]	17
obr. 2-3: Silové působení tištěného materiálu [14]	20
obr. 2-4: Režimy propojení vláken [16]	20
obr. 2-5 a) požadovaný tvar b) problematika ohnutí prutu c) protažení trajektorie d) vliv protažení na výsledek [17]	21
obr. 2-6: a) Model vytvořený čistě pomocí prutové struktury b) část modelu vyplněna vrstvou po vrstvě [17]	22
obr. 2-7: Postup 3D tisku prostorové struktury [18]	22
obr. 2-8: 3D Voroného struktura zleva: model, trajektorie tisku, vytištěná struktura [19] .	23
obr. 2-9: koncový efektor AiMaker [20]	24
obr. 2-10: Bednění pro lití betonu společnosti AI Build [20]	25
obr. 2-11: tisková hlava a způsob chlazení stlačeným vzduchem skrz trysku [22]	26
obr. 2-12: Ukázka stěny společnosti Branch Technology [1]	26
obr. 2-13: Armování betonové stěny pomocí polymerní prutové struktury [23]	27
obr. 2-14: rozdíl možností prutové struktury podle tvaru trysky [23]	27
obr. 2-15: Náčrt tiskové strategie v uzlu [24]	28
obr. 2-16: Volně orientovaná aditivní výroba [25]	29
obr. 2-17: koncový efektor [25]	29
obr. 2-18: Schéma prostorové struktury a postup její výroby [25]	30
obr. 2-19: Ukázka synchronizace dvou robotů [25]	30
obr. 2-20: Tisk svislé části, tisk převisu [26]	31
obr. 2-21: Tisková hlava umožňující vložení uhlíkového vlákna [27]	32
obr. 2-22: úprava trajektorie 3D tisku [27]	32
obr. 2-23: Technologie Material [28]	33
obr. 2-24: Vlevo: Inspirace přírodou v pavoučích sítích, vpravo: tisknutá struktura [29] .	34
obr. 2-25: Speciální tisková hlava v zavřené a otevřené poloze [29]	34
obr. 3-1: Parametry vstupující do procesu	35

obr. 4-1: Postup řešení.....	40
obr. 4-2: Základní experimentální model	41
obr. 4-3: Tisková hlava.....	42
obr. 4-4: Pracovní rozsah robota [32]	43
obr. 4-5: ATOS TripleScan [33]	43
obr. 4-6: Zjednodušený skript pro generování trajektorie.....	45
obr. 4-7: Postup jednotlivých experimentů.....	45
obr. 4-8: Experiment pro lichoběžníkové pruty.....	46
obr. 4-9: Schéma experimentu	48
obr. 4-10: Korekce trajektorie	49
obr. 4-11: Tisk vodorovného prutu.....	50
obr. 4-12: Základní strategie napojení vodorovných prutů	50
obr. 4-13: Strategie napojení vodorovných prutů	51
obr. 4-14: Omezení geometrie tiskové hlavy	52
obr. 4-15: Navržená objemová struktura	52
obr. 4-16: Prvky použité k zarovnání, nominální model vlevo, sken vpravo.....	53
obr. 4-17: Příklad vyhodnocení odchylky od ideálního tvaru	54
obr. 5-1: Vliv parametrů pro stoupající pruty a horní základnu lichoběžníku	57
obr. 5-2: Vliv úhlu prutu na velikost ramene ohybového momentu v patě prutu	58
obr. 5-3: Vliv natočení tiskové hlavy na směr síly extruze	58
obr. 5-4: Vliv jednotlivých parametrů a jejich kombinací pro první čtyři odezvy.....	59
obr. 5-5: Vliv kombinace rychlosti posuvu a úhlu prutu v bodě 2	60
obr. 5-6: Vliv kombinace úhlu prutu a úhlu naklopení v bodě 4.....	60
obr. 5-7: Vliv parametrů pro klesající pruty a úhlovou odchylku	61
obr. 5-8: Vliv kolize tiskové hlavy na přesnost klesajících prutů	62
obr. 5-9: Vliv jednotlivých parametrů a jejich kombinací pro druhé čtyři odezvy	63
obr. 5-10: Vliv kombinace úhlu prutu a úhlu naklopení v bodě 6.....	63
obr. 5-11: Grafický výstup optimalizačního nástroje	65
obr. 5-12: Tři strategie změny proudu vzduchu	68
obr. 5-13: Vzorek tištění strategií změny proudu vzduchu a).....	69

obr. 5-14: Porovnání ideálního modelu a skenu	70
obr. 5-15: Schéma odchýlení a návrh korekce	70
obr. 5-16: Strategie proudu vzduchu pro vodorovné pruty	72
obr. 5-17: Detail napojení prutů pro strategii přejezdu.....	73
obr. 5-18: Detail napojení pomocí strategie A	73
obr. 5-19: Detail napojení pomocí strategie B.....	74
obr. 5-20: Detail napojení pomocí strategie C.....	74
obr. 5-21: Detail napojení pomocí strategie D	75
obr. 5-22: Strategie napojení E	75
obr. 5-23: Detail napojení pomocí strategie E.....	75
obr. 5-24: Schéma objemové struktury	77
obr. 5-25: Schéma nastavení hladin v uzlu	77
obr. 5-26: Fotografie vytištěné objemové struktury	78
obr. 6-1: Tři pozorované nedokonalosti tisku.....	81
obr. 6-2: Tisková vada na začátku stoupajícího prutu	81
obr. 6-3: Tisková vada vznikající na začátku klesajícího prutu	82
obr. 6-4: Průřezy vzorků 6 a 10.....	82
obr. 6-5: Tisk prutové struktury s aplikovanými poznatky	83

11 SEZNAM TABULEK

tab. 2-1: Vlastnosti polymerů [11–13]	19
tab. 3-1: Shrnutí současného stavu poznání	37
tab. 4-1: Parametry skeneru ATOS TripleScan 8M [34]	43
tab. 4-2: Vlastnosti použitého materiálu [35]	44
tab. 4-3: Sledované procesní parametry	48
tab. 5-1: Parametry pro ověřovací sérii	65
tab. 5-2: Zvolené kombinace vhodných parametrů	67
tab. 5-3: Výsledky úpravy průtoku vzduchu	69
tab. 5-4: Výsledky pro tisk s korekcí	71
tab. 5-5: Porovnání výsledků s korekcí a bez korekce	71
tab. 5-6: Výsledky bez strategie napojení	73
tab. 5-7: Přehled odchylek vodorovných prutů pro jednotlivé strategie napojení	76

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Laboratorní protokol z tisku a vyhodnocení vzorků

Příloha 2: Výsledky statistického modelu

Příloha 3: Draft článku: *Accuracy of robotic 3D printed spatial polymer struts*